AUGUSTO RIGHI

LA MODERNA TEORIA
DEI
FENOMENI FISICI

(RADIOATTIVITÀ, IONI, ELETTRONI)

Terza Edizione

CONSIDEREVOLMENTE AMPLIATA

BOLOGNA
DITTA NICOLA ZANICHELLI
1907

PREFAZIONE

ALLA PRIMA EDIZIONE

Un nuovo capitolo da aggiungere ad un libro, del quale si sta preparando la ristampa, ha dato occasione, per desiderio dell' Editore Comm. Zanichelli, alla presente « Attualità ».

Quel capitolo doveva essere redatto in una forma elementare, e tal forma ho cercato, per quanto potevo, di conservare, mentre lo ampliavo trasformandolo nella nuova pubblicazione. Ciò nell' intento che questa potesse interessare il maggior numero possibile di Lettori. A quelli poi, che dei progressi della Fisica si occupano in modo speciale, riesciranno utili almeno le note bibliografiche raccolte in fine.

L' argomento trattato ora con molta generalità è quello medesimo, a cui si accennò di volo nelle prime pagine della prima « Attualità », la quale però era principalmente dedicata all' esame di uno speciale gruppo di fenomeni: di questi naturalmente non si è fatto parola nell' odierna pubblicazione.

Bologna, gennaio 1904.

A. Righi.

PREFAZIONE

ALLA SECONDA EDIZIONE

Nel preparare la nuova edizione di questo libretto non mi sono limitato a modificare qua e là il testo, nell'intento di aumentare per quanto potevo la chiarezza dell'esposizione, ma vi ho introdotto diverse aggiunte rese necessarie da numerose pubblicazioni recenti attinenti al soggetto trattato e particolarmente alla radioattività ed apparse in gran parte nel breve intervallo trascorso da che venne stampata la prima edizione.

Confido perciò che questo modesto lavoro di compilazione raggiunga sempre meglio lo scopo, pel quale venne da me intrapreso.

Bologna, marzo 1904.

A. RIGHI.

PREFAZIONE

ALLA TERZA EDIZIONE

Da quando vennero pubblicate, a pochi giorni d'intervallo fra l'una e l'altra, la prima e la seconda edizione di questo libro, sono state compiute dai fisici d'ogni paese nuove e numerose ricerche, intorno agli argomenti in esso trattati, le quali tutte hanno in larga misura rafforzata la teoria degli elettroni. Mentre questa al suo inizio poteva considerarsi come il frutto di una felice intuizione, suggerita da esperienze non sempre condotte e interpretate col dovuto rigore scientifico, essa ha ricevuto dai nuovi fatti constatati un ulteriore validissimo appoggio e brillanti conferme.

Rivedendo in bozze, per desiderio dei rispettivi traduttori, le edizioni inglese, tedesca e francese apparse poco dopo la seconda edizione, non potei naturalmente in esse introdurre che lievi aggiunte; ma per questa terza edizione italiana ho avuto l'opportunità di tener conto delle principali fra le nuove ricerche, e particolarmente di quelle relative agli interessantissimi fenomeni della radioattività. Perciò, pur facendo qualche aggiunta in quasi tutti i capitoli, ho dovuto creare un capitolo nuovo, per trattarvi in modo abbastanza completo le trasformazioni atomiche dei corpi radioattivi. Nel compiere questo lavoro ho cercato di non scostarmi da quella forma facile e piana e da quella maggior possibile chiarezza, cui sempre rivolgo ogni mia cura, e che spiega forse l'insperato favore col quale il libro è stato accolto ovunque.

Dicembre, 1906.

AUGUSTO RIGHI.

INDICE

INTRODUZIONE

Le innumerevoli ricerche sperimentali compiute in questi ultimi anni intorno alla scarica elettrica, i felici tentativi fatti per completare la teoria elettromagnetica della luce, e infine la scoperta di nuovi fenomeni magneto-ottici e quella della radioattività, hanno avuto come conseguenza la formazione d' un nuovo e interessantissimo ramo di scienza, ed il sorgere di una teoria, che tutti quei fatti armonicamente collega, e in virtù della quale le idee dominanti sulle cause immediate dei fenomeni elettrici, e in genere dei fenomeni fisici, si sono profondamente modificate.

Abbandonata l'antica ipotesi del fluido elettico, specialmente in causa della ripugnanza ad ammettere le azioni a distanza, sembrò per un momento che le idee di Faraday, concretate poi dal Maxwell, secondo le quali la sede dei fenomeni elettrici doveva supporsi nell'etere anzichè nei così detti corpi elettrizzati, dovessero condurre ad un nuovo concetto sulla causa dei fenomeni stessi; se non che l'impossibilità di trovare una rappresentazione meccanica soddisfacente delle supposte deformazioni elastiche dell'etere, a cui si attribuiscono nella teoria di Maxwell le apparenti forze a distanza, e la necessità di ammettere ad ogni modo l'esistenza di una entità distinta dall'etere e dalla materia, mostrarono ben tosto, che anche nel nuovo ordine di idee l'elettricità restava una incognita.

Oggi una nuova evoluzione si è compiuta, giacchè, senza tuttavia conoscere nulla di più in quanto alla causa prima, si attribuisce alla elettricità una struttura atomica. Questo nuovo con-

cetto, suggerito dagli studi accennati più sopra, mostra già di riescire così fecondo quanto l'analogo da lungo tempo ammesso rispetto alla costituzione della materia, in quanto che esso si presta a mettere in reciproca relazione, spesso anche quantitativamente, fenomeni che sembravano disparatissimi e fra loro indipendenti.

Che cosa siano gli *elettroni* o atomi elettrici rimane un mistero; ma ad onta di ciò, la nuova teoria potrà forse acquistare col tempo una non piccola importanza anche dal punto di vista filosofico, poichè essa indica un nuovo modo di considerare la struttura della materia ponderabile, e tende a ricondurre ad un'unica origine tutti i fenomeni del mondo fisico.

È bensì vero, che colle moderne tendenze positiviste ed utilitarie molti non apprezzano questo pregio, e preferiscono considerare una teoria sopratutto come un mezzo comodo per ordinare e coordinare i fatti o come una guida nella ricerca di fenomeni nuovi. Ma se per l'ad-

dietro troppo si confidava nel potere dell' ingegno umano, e troppo facilmente si credeva d' essere prossimi a scoprire la ragione suprema delle cose, oggi si cade forse nell' eccesso contrario.

In questo scritto saranno esposti i fatti principali, che hanno condotto alla teoria degli elettroni, e si cercherà di far conoscere questa teoria almeno nelle sue linee generali.

CAPITOLO I.

Ioni elettrolitici ed elettroni (*).

Per ispiegare il fenomeno dell' elettrolisi, in accordo colle leggi ben note di Faraday a cui quel fenomeno obbedisce, si ammette da tutti l'ipotesi della dissociazione elettrolitica, secondo la quale ogni molecola di un elettrolita può scindersi in due *ioni*, cioè in due atomi o gruppi atomici aventi cariche elettriche uguali e di nome contrario. Così se un sale, come il cloruro di sodio o sale comune, viene sciolto nell' acqua, parte delle sue molecole subisce la dissociazione, e cioè queste molecole cessano di esistere come tali, rimanendo disgiunti e liberi i ioni che le

(*) I numeri fra parentesi inseriti nel testo servono a richiamare le citazioni raccolte in fondo al libro.

costituiscono. In virtù dei moti molecolari ed atomici invisibili, la cui energia costituisce il calore contenuto in un corpo, quei ioni vagano nel liquido, senza però che nessuna direzione di moto sia preferita; nei reciproci incontri accade, ora che una molecola si scinda in ioni, ora che ioni distinti ricompongano delle molecole. Sono, per così dire, connubi e divorzi incessanti, ad onta dei quali il numero di molecole dissociate rimane nel tempo sensibilmente invariabile.

Quando due elettrodi comunicanti coi poli d' una pila siano immersi nella soluzione, i ioni delle due specie, e cioè i ioni positivi di sodio e quelli negativi di cloro (per proseguire nell' esempio scelto) non si muovono più indifferentemente nelle varie direzioni; ma, obbedendo alle forze elettriche, i primi vanno accostandosi all' elettrodo negativo o *catodo*, i secondi al positivo o *anodo*. Giungendo sugli elettrodi i ioni cedono ad essi le loro cariche e divengono atomi neutri che restano liberi, a meno che (come accadrebbe appunto nel caso del sodio) non avvenga qualche azione chimica speciale fra questi atomi

ed i corpi coi quali si trovano in contatto, e cioè l'elettrodo od il liquido.

La corrente elettrica nel liquido consiste in questo trasporto di elettricità effettuato dai ioni.

L' elettrolisi obbedisce alle due leggi, che furono enunciate da Faraday. Si soddisfa alla prima di queste leggi, la quale asserisce la proporzionalità esistente fra la quantità di elettricità che attraversa il liquido e la quantità di materia depositata sugli elettrodi, ritenendo che tutti i ioni esistenti nel liquido posseggano cariche eguali in valore assoluto. Così, nel caso del cloruro di sodio, i ioni di questo metallo hanno cariche positive tutte eguali fra loro, ed eguali ma di contrario segno alla carica di uno qualunque dei ioni di cloro.

Si soddisfa alla seconda legge di Faraday, in virtù della quale, quando la stessa quantità di elettricità è trasmessa da differenti elettroliti (per esempio messi l' uno dopo l' altro in un unico circuito), le quantità di essi che rimangono decomposte sono proporzionali ai rispettivi equivalenti chimici, ammettendo, che tutti gli

atomi monovalenti posseggano una carica ugua
in valore assoluto a quelle dei ioni di sodio
di cloro, che tutti gli atomi abbiano una caric
doppia di queste quando si comportano com
bivalenti, e così di seguito. Ecco un esempio
per chiarire questo punto. Se si farà passare
una corrente in una soluzione di quel cloruro di
rame la cui molecola contiene due atomi di rame
(monovalente) e due di cloro, come pure nella
soluzione dell' altro cloruro, la cui molecola contiene un atomo (bivalente) di rame e due di
cloro, si raccoglierà sul catodo della prima soluzione doppia quantità di rame che sul catodo
della seconda, mentre naturalmente la quantità
di elettricità trasportata attraverso i due liquidi
sarà la stessa.

Sino dal 1881 l' illustre Helmholtz fece notare, come dalle leggi della elettrolisi venga suggerita l' idea, che la carica elettrica spettante ad ogni valenza d' un ione sia una quantità fissa avente una esistenza a parte; e, come un atomo materiale è una porzione determinata d' una certa qualità di materia ed è considerato come indi-

visibile, così è naturale considerare come indivisibile quella carica elettrica, tanto più che mai si riscontra una quantità di elettricità più piccola. La carica del ione (monovalente) può dirsi dunque *atomo* di elettricità, o meglio, secondo la denominazione proposta dal Sig. Stoney, *elettrone* (*ione elettrico*).

Veramente il concetto d' una struttura atomica dell' elettricità era stato emesso già dal Weber nel 1871, cioè assai prima che da Helmholtz. Quell' insigne fisico e matematico propose, come è noto, una teoria, secondo la quale i fenomeni elettrici sarebbero dovuti a particelle o atomi di elettricità positiva e di elettricità negativa agenti fra loro a distanza con forze dipendenti, non solo dalla distanza stessa, ma anche dalla velocità delle particelle e dalle loro accelerazioni, ossia dal modo nel quale variano quelle velocità. Naturalmente una tale teoria, nella quale si ammettevano ancora le azioni a distanza, non ha di comune con quella oggi in favore che il concetto fondamentale dell' atomo elettrico; e quantunque il Weber, cercando nella sua teoria

la ragione delle forze che presiedono alla struttura atomica dei corpi, emettesse l' ipotesi « che ad ogni atomo ponderabile sia unito un atomo elettrico » (1), la relazione oggi ammessa tra ioni ed elettroni sembra sia stata meglio intravvista da Helmholtz.

Non si creda che l' ipotesi atomistica dell' elettricità imponga di considerarla come una materia, giacchè si è sempre liberi di supporre, che un elettrone sia semplicemente una condizione speciale localizzata dell'etere universale. Si può anzi fin d' ora aggiungere che, piuttosto di considerare l' elettricità come materia si è oggi condotti ad un' ipotesi diametralmente opposta, cioè a supporre che gli atomi dei vari corpi siano sistemi di elettroni.

Allorchè i ioni giungendo sugli elettrodi divengono atomi neutri, gli elettroni entrano in circuito a costituire la corrente elettrica. Ora sembra naturale supporre che questi elettroni, anzichè fondersi, per così dire, in un tutto omogeneo (per esempio l' antico fluido elettrico), conservino la loro individualità, tanto più che, se debbano

passare da un atomo all'altro, è verosimile che debbano momentaneamente esistere isolati; ed allora la corrente elettrica nei conduttori altro non sarà che un movimento di elettroni liberi attraverso gli spazi interatomici. Rimarrà indeterminato, se la corrente consista nel moto di elettroni positivi in un senso e di negativi in senso contrario, oppure nel moto in un determinato senso d'una delle due specie di elettroni, per esempio i negativi; ma si dà la preferenza a quest'ultima opinione perchè, mentre si ha ragione di ritenere che gli elettroni negativi possano esistere liberi, altrettanto non è per quelli positivi. I primi soli, a quanto pare, si spostano, si separano dalla materia ponderabile o vi si uniscono, e vibrano nelle sorgenti luminose, come si vedrà fra poco. Ammesso che gli elettroni negativi e non i positivi si spostino negli atomi e nelle molecole, gli scambi fra i ioni e gli elettrodi nell'elettrolisi dovranno essere considerati nel modo seguente. Un ione negativo depositandosi sull'anodo cede a questo un elettrone negativo; un ione positivo giungendo sul catodo non cede a questo un elet-

trone positivo, ma ne prende uno negativo dal catodo stesso.

Ecco dunque che in certo modo l'antica teoria del fluido elettrico è richiamata in vita, quantunque profondamente modificata. Non si tratta più infatti del fluido continuo, ma di atomi speciali (gli elettroni), i quali del resto, come si è già osservato, non sono necessariamente da considerarsi come materiali nel senso ordinario della parola.

Inoltre, e ciò importa assai più, non si attribuisce agli atomi di elettricità quella misteriosa facoltà di agire a distanza, di cui si supponeva dotato l'antico fluido, ma invece si ammette, che le forze reciproche fra gli elettroni abbiano la loro causa in deformazioni elastiche speciali dell'etere, identiche a quelle invocate dalla teoria di Maxwell per rendere conto delle forze elettriche fra conduttori.

Per ispiegare i fenomeni dell'elettrolisi basta a rigore ammettere, come si è fatto sempre, l'ipotesi della dissociazione elettrolitica; ma questa ipotesi non si presta bene a render ragione della

propagazione dell'elettricità nei gas e di vari altri fenomeni. Invece, coll'ammettere la *dissociazione elettrica*, cioè la separazione degli elettroni negativi dagli atomi neutri, si dà ragione tanto dell'elettrolisi quanto degli altri fenomeni.

Perchè da un atomo neutro possa separarsi un elettrone negativo, occorre spendere energia nel vincere l'attrazione, in virtù della quale l'elettrone è trattenuto dal ione positivo, che è ciò che rimane dell'atomo quando gli si è tolto l'elettrone negativo, precisamente come occorre fornire energìa calorifica per allontanare l'una dall'altra le molecole di un liquido che si fa evaporare, o come bisogna spendere un lavoro meccanico per sollevare un peso da terra.

L'energia necessaria a *ionizzare o dissociare* un atomo è naturalmente diversa a seconda della natura chimica di esso. L'esperienza indica, che tale energia è minima per i corpi così detti elettropositivi, quali i metalli, e gradatamente maggiore procedendo verso i più elettronegativi, i quali inoltre possono anzi assimilarsi nuovi elettroni negativi; e che essa dipende anche dalla

natura e dalle condizioni degli atomi circostanti a quello che deve scindersi in elettrone e ione positivo. Così è estremamente piccola per i corpi in soluzione acquosa.

Ciò posto, la dissociazione elettrolitica, cioè la separazione di una molecola in due ioni, per esempio quella del cloruro sodico in un ione positivo di sodio ed uno negativo di cloro, deve considerarsi come conseguenza della dissociazione dell' atomo metallico.

Questo si scinde in un ione positivo di sodio ed un elettrone negativo, il quale, trattenuto dall' atomo di cloro, trasforma quest' ultimo in ione negativo. Adottato questo modo di considerare la dissociazione elettrolitica, questa, con tutte le sue importantissime conseguenze, rientra nella teoria più generale della dissociazione elettrica, ossia nella teoria degli elettroni.

CAPITOLO II.

Gli elettroni ed i fenomeni luminosi

Mentre l'ipotesi degli elettroni scaturisce in modo così naturale dai fenomeni elettrolitici, è in tutt'altro campo della Fisica, e precisamente in quello dell'Ottica, che essa trovò una inaspettata e brillante conferma.

Che la luce sia un fenomeno vibratorio, e non possa assolutamente più considerarsi dovuta, come voleva Newton, all'emissione di speciali corpuscoli dai corpi luminosi, è cosa ormai da tutti conosciuta, ed in favore della quale parlano molte, belle e classiche esperienze, alle quali sono legati i nomi di Young, di Fresnel, di Foucault, ecc. E quando si parla di luce, necessariamente si parla in pari tempo di radiazione calorifica, non potendo sussistere, dopo le celebri

ricerche di Macedonio Melloni, nessun dubbio intorno all' identità di natura di quei fenomeni apparentemente così diversi.

Ma la teoria ondulatoria richiede un mezzo capace di propagare le onde; di qui la necessità d' ammettere l' esistenza dell' etere, cioè d' una sostanza sparsa ovunque, negli spazi interplanetari ed interstellari come negli spazi interatomici. L' ipotesi dell' etere s' impone in modo irresistibile, e sembra quasi acquistare il carattere di realtà e di certezza, quando si considera la perfezione con cui l' ipotesi ondulatoria rende conto, anche quantitativamente e nei più minuti dettagli, di tutti i fenomeni ottici.

Sull' esempio di Fresnel si considerarono per molto tempo le vibrazioni luminose come vere e proprie vibrazioni meccaniche delle particelle eteree e materiali; ma più tardi si riconobbe, specialmente per opera di Maxwell, che si potevano considerare le onde luminose come onde elettromagnetiche, con che si collegavano due classi distinte di fenomeni fisici. La teoria elettromagnetica della luce ricevette in questi ultimi

anni un solido appoggio dalle note esperienze di Hertz e da quelle successive di altri fisici; ed oggi non v' ha forse chi si rifiuti ad ammettere, che i fenomeni della luce siano in realtà fenomeni elettromagnetici, e che le onde luminose differiscano da quelle che Hertz ha insegnato a produrre soltanto per certi valori numerici, e precisamente per la diversa lunghezza d'onda, o, se si vuole, per il diverso periodo di vibrazione. Le onde hertziane hanno infatti periodi assai più lunghi di quelli delle onde luminose, e stanno a queste come un suono molto grave sta a suoni acutissimi.

Però la teoria elettromagnetica della luce, quale si ricava dalle proprietà del campo elettromagnetico, non vale a dar ragione di quei fenomeni, per render conto dei quali si dovette ricorrere, anche nella teoria meccanica, ad un'azione della materia ponderabile sull' etere. A completare la teoria oggi accettata era dunque necessario far intervenire in qualche modo gli atomi materiali, e vi riuscì il fisico olandese Lorentz, coll' aiuto d' una ipotesi analoga a quella adottata

per spiegare l'elettrolisi, e cioè supponendo l'esistenza di cariche elettriche delle due specie nelle molecole di tutti i corpi. È chiaro che tali cariche elettriche prenderanno parte ai fenomeni luminosi, quando questi vengano considerati come dovuti ad onde elettromagnetiche, sia perchè la forza elettrica e la forza magnetica che si manifestano al passaggio d' un' onda tenderanno a modificare il moto di quelle cariche, sia perchè il moto vibratorio di queste potrà essere origine di simili onde.

Esaminando le conseguenze delle ipotesi fatte, il Lorentz riconobbe, che per giungere ad una teoria elettromagnetica della luce atta a spiegare anche quei fenomeni, che sfuggivano alla teoria basata semplicemente sulle formule di Maxwell o di Hertz, era necessario supporre che, o soltanto le cariche positive o soltanto quelle negative potessero muoversi e prendere parte ai fenomeni luminosi. Vedremo fra poco che le cariche mobili devono essere quelle negative.

La teoria di Lorentz ha ricevuto, or sono pochi anni, una conferma brillantissima per opera del sig. Zeeman, già allievo del Lorentz, il quale

scoprì un nuovo ed interessantissimo fenomeno, di cui conviene qui far parola.

È noto che un gas luminoso emette radiazioni di determinati periodi vibratori, e non quelle corrispondenti a periodi intermedi che si seguano con continuità. E poichè le luci dei diversi colori, corrispondenti a diversi periodi vibratori, vengono in diverso grado deviate da un prisma, in modo da distribuirsi le une a fianco delle altre sul diaframma da esse colpito, e da formare così il ben noto spettro, nel caso del gas luminoso non si osserverà uno spettro completo costituito da tutti i colori semplici degradanti l' uno nell' altro dal rosso al violetto, ma si vedranno invece solo certi colori determinati, separati da intervalli oscuri. Ogni colore di determinato periodo contribuisce alla formazione dello spettro dando luogo ad una strettissima riga trasversale, imagine della stretta fenditura, attraverso la quale si deve far passare la luce prima che penetri nel prisma; lo spettro di un gas luminoso è dunque costituito da righe luminose, separate le une dalle altre, che, colla diversa loro posizione nello

spettro, e colla loro diversa intensità, caratterizzano perfettamente il gas, dalla cui luce provengono. Per esempio, lo spettro della luce emessa dal sodio allo stato gassoso è formato da due righe gialle vicinissime, che cogli spettroscopi poco potenti appaiono confuse in una sola.

Ora Zeeman dimostrò che, se il gas è posto in un intenso campo magnetico, per esempio fra i due poli di una potente elettrocalamita, ogni semplice riga del suo spettro è sostituita generalmente da un gruppo di righe nuove.

Due casi principali sono qui da considerarsi, e cioè: 1.° quello in cui il raggio luminoso che si considera sia parallelo alle linee in forza magnetica; 2.° quello in cui il detto raggio sia perpendicolare a queste linee. Il caso generale è naturalmente un poco complicato, e per esso rimando il lettore a lavori speciali.

Supponiamo che fra due opposti poli magnetici si trovi un gas luminoso, per esempio il vapore di cadmio, quale si può ottenere facendo scoccare delle scintille elettriche fra due fili di

quel metallo. Se si esamina la luce, che si propaga nel senso delle linee di forza (1.° caso), ossia da un polo verso l'altro, si constata facilmente, che, mentre la riga verde dello spettro del cadmio appare nitidissima e semplice come in A (fig. 1) quando non esiste il campo magnetico,

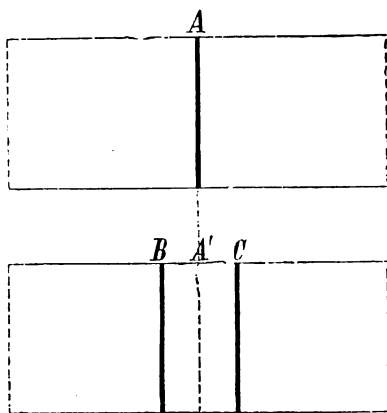



Fig. 1.

non appena questo è creato, la riga A sparisce, e invece di essa ne appaiono due nuove B, C, una da una parte e una dall'altra della posizione A', che l'unica riga prima occupava, e ad uguali distanze.

Se si studia collo spettroscopio un raggio di luce in direzione equatoriale (2.° caso), e cioè perpendicolare alla direzione del campo magnetico, l' unica riga *A* (fig. 2) è sostituita da tre righe *C*, *A'*, *B*, di cui quella di mezzo, equidi-

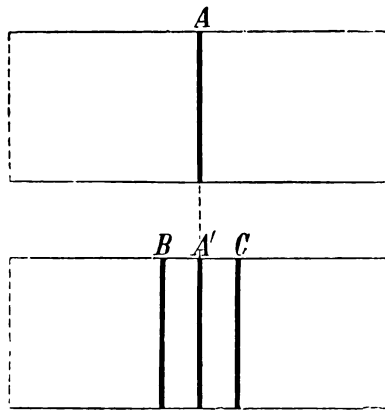



Fig. 2.

stante dalle altre due, occupa il posto della riga primitiva.

Per altre righe spettrali o si hanno fenomeni identici a questi che presenta la riga verde del cadmio, oppure effetti un poco più complicati. Così, per esempio, delle due righe del sodio, una, quella che si suol chiamare D_1, si trasforma nel

2.° caso in quattro righe *A*, *B*, *C*, *D*, (fig. 3),

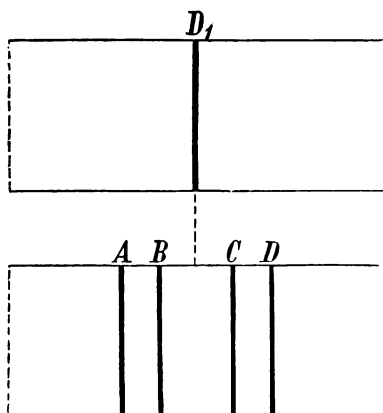



Fig. 3.

mentre la D_2 si muta in un gruppo di sei righe (fig. 4) *A*, *B*, *C*, *D*, *E*, *F*.

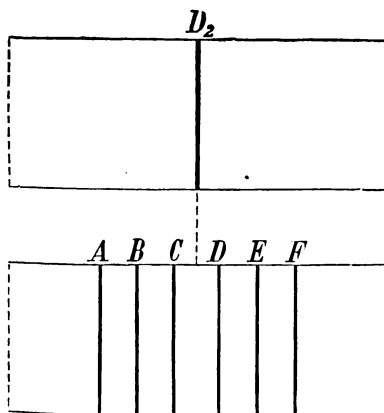



Fig. 4.

La teoria del Lorentz spiega completamente questi fenomeni, almeno nei casi meno complicati; ma basterà qui prendere in ispeciale considerazione il caso più semplice, quello al quale si riferisce la fig. 1, della riga verde del cadmio, quando la luce è emessa nella direzione delle linee di forza.

Si abbia una particella elettrizzata, che attratta verso una posizione d'equilibrio O (fig. 5) vibri circolarmente attorno a questa descrivendo una circonferenza di raggio $O\,A$. La particella elettrizzata vibrante genera delle onde luminose. Supporremo di studiare la luce che si propaga nella direzione perpendicolare al piano della circonferenza. Se in questa stessa direzione agisce un campo magnetico, esiste ad ogni istante una forza elettromagnetica, analoga a quella che agirebbe sopra un breve tratto di corrente elettrica diretta come la velocità della particella. Questa forza sarà dunque diretta secondo il raggio $O\,A$ passante per la particella

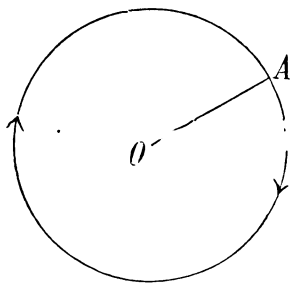



Fig. 5.

mobile, ed agirà, a seconda dei casi, o da *A* verso *O* o in verso contrario. L' effetto di questa nuova forza, che si aggiunge o si sottrae a quella che mantiene la particella nella sua orbita, è quello di modificare il suo periodo vibratorio, cioè il tempo impiegato dalla particella a descrivere la circonferenza, precisamente come un cambiamento nell' intensità della forza di gravità ha per effetto una variazione nel periodo di oscillazione di un pendolo.

Dall' effetto prodotto dal campo magnetico sopra una vibrazione circolare si passa facilmente a quello sopra una vibrazione qualunque. Ecco come.

Le vibrazioni luminose sono perfettamente conosciute. Esse seguono le stesse leggi delle piccole oscillazioni di un pendolo, ed in generale sono elittiche; in casi particolari possono essere rettilinee o circolari, sempre però trasversali, cioè giacenti in un piano perpendicolare al raggio luminoso. Ora si può dimostrare questa equivalenza cinematica, e cioè che ogni vibrazione elittica si può considerare come risultante di due

vibrazioni circolari di sensi opposti di girazione, e cioè l' una destrogira (moto nel medesimo senso di quello degli indici di un orologio), l' altra levogira; e si potrebbe aggiungere, che quella delle due vibrazioni circolari che ha egual senso di girazione dell' elisse EF (fig. 6), e cioè AB, ha un diametro eguale alla semisomma degli assi dell' elisse, mentre l' altra vibrazione circolare CD ha un diametro eguale alla semidifferenza degli assi medesimi (*). Se poi non si ama ricorrere a dimo-

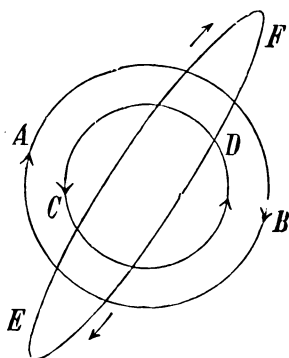



Fig. 6.

(*) Coi simboli usuali la vibrazione elittica, riferita ai suoi assi, può rappresentarsi mediante le sue componenti rettilinee $x = a \text{ sen } \theta$, $y = b \cos \theta$. Essa equivale evidentemente alla risultante di due vibrazioni circolari, una destrogira come l' elisse data e di componenti $x = \frac{a+b}{2} \text{ sen } \theta$, $y = \frac{a+b}{2} \cos \theta$, e l' altra levogira, e di componenti $x = \frac{a-b}{2} \text{ sen } \theta$, $y = -\frac{a-b}{2} \cos \theta$.

strazioni matematiche, si può persuadersene adoperando uno speciale apparecchio, il quale, oltre che servire ad altri usi, vale ad affettuare la

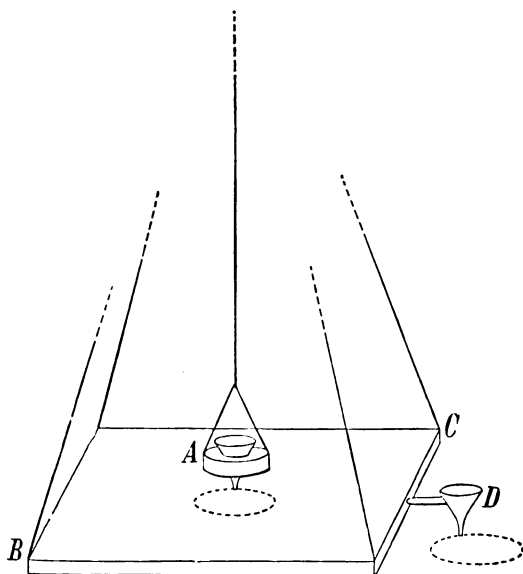



Fig. 7.

composizione di due oscillazioni pendolari di forma circolare (2).

Due pendoli (fig. 7) sono sospesi a due punti fissi (per semplicità non rappresentati nella figura) posti sopra una medesima verticale. Uno dei pendoli è costituito da un semplice filo metal-

lico portante in basso un anello pesante ed un imbuto *A* pieno di sabbia; la parte inferiore dell'altro è una tavoletta *B C*, situata al disotto di *A*, che porta lateralmente un secondo imbuto *D* con sabbia. La lunghezza del primo pendolo può variarsi a piacere; ma, per l'esperienza di cui qui si tratta, deve esser tale, che i due pendoli abbiano egual periodo di oscillazione. Un congegno elettrico, facile ad immaginare, permette poi di chiudere o aprire a piacere i fori degli imbuti, ed arrestare così o permettere l'efflusso della sabbia.

Lasciando dapprima immobile il pendolo *B C* si dia ad *A* un moto circolare; e si riconoscerà se sia tale, dalla traccia che la sabbia lascia sulla tavoletta *B C*. S'imprima allora un moto d'oscillazione circolare anche al pendolo *B C*, con direzione opposta a quella dell'altro pendolo; e si riconoscerà se vi si riesce, osservando la traccia di sabbia formata dall'imbuto *D* sopra un piano sottostante. Se, ora che i due pendoli oscillano, si fa effluire la sabbia dall'imbuto *A*,

si forma sulla tavoletta $A\ B$ una traccia elittica, la quale diventa una retta, se le due vibrazioni circolari componenti hanno diametro eguale. E così si resta persuasi del fatto enunciato, ed anzi si impara di più, che quando le due vibrazioni componenti circolari di girazione inversa hanno uguale ampiezza, la vibrazione risultante è rettilinea.

Tornando ora alla particella vibrante nel campo magnetico, essa in generale compirà una vibrazione elittica, e a questa potremo supporre sostituite le due vibrazioni circolari a cui equivale. Ma queste sono di girazioni opposte; se una è accelerata dal campo magnetico, l'altra è ritardata. Ed una volta che i loro periodi non sono più uguali, non possono più dare nello spettro un'unica riga, ma due nuove righe poste una per parte dall'unica riga primitiva. Questa spiegazione, fornita dalla teoria di Lorentz per l'esperienza di Zeeman, venne da questo abile sperimentatore dimostrata esatta per mezzo di nuove esperienze, le quali provarono, che le

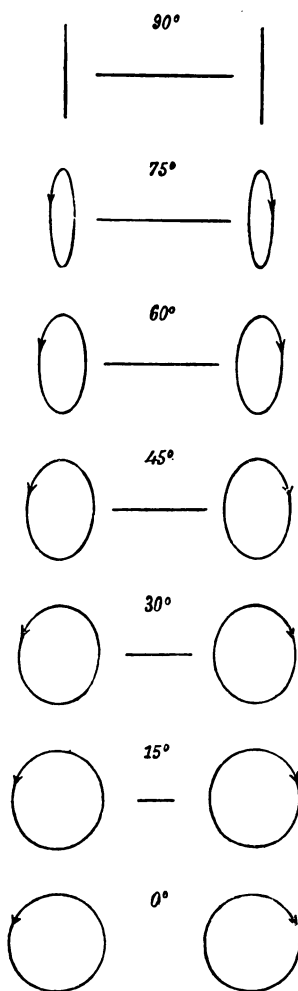
due nuove righe erano effettivamente dovute a vibrazioni circolari, una destrogira e l' altra levogira.

Nel caso della luce emessa in direzione perpendicolare a quella della forza magnetica, la teoria fa prevedere, che la riga centrale *A'* (fig. 2) sia dovuta a vibrazioni rettilinee parallele alla forza magnetica, e le righe laterali *B*, *C* a vibrazioni rettilinee perpendicolari alla forza stessa. Anche queste particolarità vennero confermate dall' esperienza.

Chi scrive studiò poi il caso più generale, quello cioè della luce emessa in una direzione formante un certo angolo compreso fra 0° e 90° colla direzione del campo magnetico (3). Mentre (col cadmio) si osservò sempre che tre righe *B*, *A'*, *C* compaiono al posto della *A* (fig. 2) quando si crea il campo magnetico, teoricamente si previde, e l'esperienza confermò, che la riga centrale è sempre dovuta a vibrazioni rettilinee giacenti in un piano parallelo alla forza magnetica, e che le righe laterali sono dovute a vibrazioni elittiche. La fig. 8 mostra la forma delle

vibrazioni luminose nelle tre righe, per vari valori dell'angolo compreso fra la direzione della luce che si studia e la direzione del campo magnetico, e in pari tempo mostra l'ampiezza relativa delle vibrazioni stesse. Le linee segnate 90° corrispondono al caso della fig. 2; quelle segnate 0° al caso considerato dapprima, e cioè a quello della fig. 1.

Fig. 8.

Come si vede, passando dal caso della luce parallela alla direzione del campo al caso della luce perpendicolare, le due vibrazioni circolari di opposti sensi di girazione si schiacciano a poco a poco divenendo elittiche, e infine rettilinee e

perpendicolari alla direzione del campo; in pari tempo sorge la riga centrale a vibrazioni sempre rettilinee e contenute in un piano paralello alla forza magnetica, l' ampiezza delle quali aumenta gradatamente quando l' angolo compreso fra il raggio luminoso e la forza stessa cresce da 0° a 90°.

Opportune esperienze qualitative e quantitative permisero in seguito di ricavare dal fenomeno di Zeeman due risultati interessantissimi.

Esaminando quale delle due nuove righe era data, per una determinata direzione del campo magnetico, da vibrazioni destrogire e quale da levogire, si potè determinare il segno della carica delle particelle vibranti, e si riconobbe che, per mettere d' accordo i fatti osservati colla loro spiegazione, era necessario ammettere che quelle particelle avessero carica negativa e non positiva.

In secondo luogo si potè ottenere una valutazione approssimata del rapporto fra la carica elettrica della particella vibrante e la sua massa

materiale (*). Il risultato al quale si giunse fu, che tale rapporto è circa un migliaio di volte quello relativo agli atomi dell'idrogeno nell'elettrolisi, e quindi a maggior ragione più grande di quello spettante agli atomi delle altre sostanze.

(*) Sia a il raggio OA (fig. 5) della circonferenza descritta dalla particella vibrante, $k_0 a$ la forza che tende a portarla alla sua posizione di equilibrio O, v_0 la velocità costante con cui percorre la sua traiettoria, T_0 il periodo di vibrazione, cioè il tempo impiegato a percorrere la circonferenza, quando non esiste campo magnetico. Sarà $v_0 T_0 = 2\pi a$, $k_0 T_0^2 = 4\pi^2 m$, dicendo m la massa della particella. L'ultima formula, che si può scrivere:

$$T_0 = 2\pi \sqrt{a : \frac{k_0 a}{m}}$$

non è che la nota formola del pendolo. Quando agisce un campo magnetico H perpendicolare al piano della vibrazione, la carica in moto e della particella subisce l'azione della forza elettromagnetica, come se essa fosse un elemento di corrente. Se v è ora la velocità della particella, la detta forza, la cui direzione giace su OA, per esempio da A verso O, sarà data da Hev. Perciò la forza agente ora sulla particella sarà $k_0 a + Hev$, ossia, dicendo T il nuovo periodo vibratorio,

$$k_0 a + 2\pi a He : T$$

Questo risultato può essere interpretato in più maniere, fra cui queste due principali. O le particelle vibranti sono ioni, ed in tal caso la loro carica non è più la solita che spetta ad ogni valenza nell' elettrolisi, ma è invece una carica circa un migliaio di volte maggiore; oppure le particelle vibranti hanno una carica eguale a quella dei ioni elettrolitici, ed allora la loro massa è circa un migliaio di volte minore della massa d' un atomo d' idrogeno. La seconda interpretazione è naturalmente quella accettata, e si

Insieme alla $k_0 T_0^2 = 4\pi^2 m$, avremo ora la nuova equazione

$$(k_0 + 2\pi He : T) T^2 = 4\pi^2 m,$$

dalle quali eliminando k_0 si deduce:

$$T_0 - T = \frac{He}{2\pi m} \frac{T T_0^2}{T + T_0}.$$

Sostituendo ai periodi T_0 e T le corrispondenti lunghezze d' onda λ_0 e λ, e tenendo conto del fatto che λ e λ_0 differiscono sempre di pochissimo, si ha, dicendo V la velocità della luce:

$$\lambda_0 - \lambda = \frac{He\lambda_0^2}{4\pi m V},$$

da cui

$$\frac{e}{m} = \frac{4\pi V}{H\lambda_0^2} (\lambda_0 - \lambda).$$

considerano le particelle vibranti come elettroni liberi. Questi posseggono dunque (oppure ad essi è unita) una piccola massa materiale; ma vedremo che probabilmente tale massa ha una causa elettromagnetica. In ogni modo, questo risultato è corroborato da quelli cui si perviene per altre vie, come si dirà più avanti.

La teoria di Lorentz riceve dunque dalle esperienze di Zeeman una splendida conferma, e si può quindi ritenere, che la struttura degli atomi materiali sia tale da permettere agli elettroni negativi, che ne fan parte, di vibrare liberamente, mentre la parte positiva resta relativamente immobile. Perciò ci figuriamo un atomo neutro come costituito da una porzione, che nel suo complesso ha carica positiva, e da uno o più elettroni negativi, che si muovono intorno a quella come i satelliti intorno ad un pianeta, trattenuti nelle orbite loro da una forza centrale.

Sono assai noti oggi i così detti oscillatori, cioè gli apparecchi che si adoperano per generare le onde elettromagnetiche. Una delle forme possibili, se non praticamente vantaggiose, è

quella di un corpo elettrizzato dotato di un movimento vibratorio (circolare, elittico o rettilineo), per esempio mosso da un corpo sonoro in vibrazione (4). Ebbene, basta immaginare sostituito al corpo elettrizzato un semplice elettrone, e supporre estremamente breve il periodo vibratorio (ed anzi rappresentato da una frazione di minuto secondo che abbia per numeratore l'unità e per denominatore un numero di quindici cifre), perchè, invece di avere le onde elettromagnetiche di Hertz, si abbiano le ordinarie onde luminose.

CAPITOLO III.

Natura dei raggi catodici (*)

I fenomeni, dei quali si darà ora un cenno, mostrano gli elettroni negativi, mentre sono animati da rapidissimi moti di traslazione, anzichè da moti di vibrazione come nel precedente Capitolo. Essi si presentano quindi sotto favorevoli condizioni affinchè si possano studiare più intimamente, per esempio modificandone in vario modo il movimento, con che si darà origine ad effetti nuovi ed interessanti. Ma per la chiarezza di quanto devesi esporre in questo Capitolo giova richiamare dapprima i principali caratteri offerti dalle scariche elettriche nei gas rarefatti.

(*) Chi desideri acquistare più profonda conoscenza di quanto non è che accennato in questo e nel successivo Capitolo, potrà consultare le opere dei sigg. Stark, Lodge e Thomson (5).

Si abbia un tubo di vetro *A C* (fig. 9), attraverso le pareti del quale e alle sue estremità

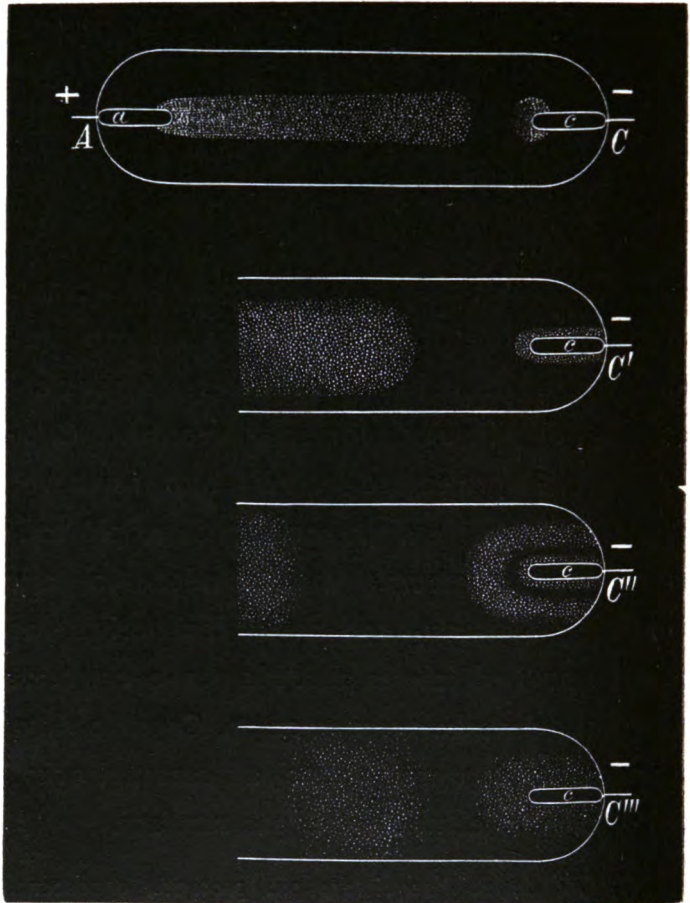



Fig. 9.

siano saldati due fili di platino portanti due elet-

trodi di alluminio *a*, *c*. Se la pressione dell'aria entro il tubo è inferiore a quella dell' atmosfera, ma non tanto piccola, per esempio otto o dieci millimetri di mercurio, e si fa passare la scarica elettrica da un elettrodo all' altro, invece della ben nota scintilla brillante e rumorosa, che si forma all' aria libera, si ottiene un fenomeno luminoso caratteristico, nel quale si distinguono due parti: la colonna luminosa positiva, specie di scintilla rosea troncata e a contorni diffusi, che va dall' anodo sino a qualche distanza dal catodo, e la luce negativa o *bagliore*, di color violaceo e attigua a quest' ultimo elettrodo. Fra queste due luminosità resta un intervallo detto *spazio oscuro di Faraday*.

Se ora si diminuisce la pressione dell' aria, quelle apparenze luminose cambiano. Senza occuparci per ora della colonna positiva, la quale col crescere dalla rarefazione va perdendo via via in estensione e in intensità luminosa, spesso suddividendosi in parti distinte separate da intervalli relativamente oscuri (scarica stratificata), occupiamoci della luce negativa. Dapprima essa si

estende sull'intero catodo (come in C'), se prima non ne occupava che l'estremità; ma poi, con ulteriore rarefazione, essa si estende tutt'intorno sino a distanza di più in più grande, staccandosi in pari tempo dall'elettrodo come in C''. In contatto di questo si è intanto formato un nuovo strato luminoso, per cui la luce negativa è ora divisa in due parti, e cioè il *primo strato negativo*, aderente al catodo, ed il *secondo strato negativo* o bagliore, separati da un intervallo relativamente oscuro, che, per distinguerlo dallo spazio oscuro di Faraday, dicesi *spazio oscuro del catodo.* Spingendo anche più oltre la rarefazione, i due strati luminosi negativi si estendono di più, diventando meno luminosi e a contorni meno netti (C''' fig. 9). Anche l'intervallo che li separa diviene più ampio; e, quando si raggiunge la massima rarefazione, e cioè si riduce la pressione dell'aria ad essere minore di un millesimo di millimetro di mercurio, ogni luminosità del gas sparisce quasi completamente.

Ma prima che si arrivi a questo punto un nuovo fenomeno si produce. Le pareti del tubo

intorno e poi di fronte al catodo divengono luminose, spandendo una viva luce, generalmente verde, dovuta ad una specie di fosforescenza, o meglio forse di *fluorescenza*, dandosi questo nome a quell'emissione di luce presentata da alcuni corpi, come lo spato fluore, la quale non dura apprezzabilmente, dopo che sia cessata la causa produttrice di essa. La causa di questa luminosità delle pareti risiede nel catodo, giacchè, se si interpone un ostacolo qualunque, si produce sulla parete una nettissima ombra, come se la fluorescenza fosse eccitata da raggi invisibili partenti dall'elettrodo negativo. È di questi raggi, ai quali si è dato il nome di *raggi catodici*, che dovremo ora occuparci.

Essi si propagano in linea retta e partono dal catodo in direzione perpendicolare alla sua superficie; per cui, se esso ha la forma di uno specchio concavo, i raggi catodici concorrono sensibilmente nel centro di curvatura. Così concentrati meglio dimostrano le loro singolari proprietà, che in modo tanto brillante e suggestivo

vennero messe in evidenza da W. Crookes con apparecchi ingegnosamente combinati.

Le principali proprietà dei raggi catodici sono le seguenti. Essi eccitano, come si è visto, la fosforescenza, e non solo del vetro, ma di molti corpi, fra cui quelli nei quali la fosforescenza è eccitata anche dalla luce. I raggi catodici riscaldano i corpi da essi colpiti e tendono a spostarli, come se meccanicamente li urtassero. Può darsi però che quest' azione meccanica sia, almeno in massima parte, una semplice conseguenza dell' effetto precedente. Infine i corpi colpiti dai raggi catodici divengono sorgente di nuovi raggi, i famosi raggi X, scoperti dal prof. Rontgen.

È necessario accennare qui brevemente alle proprietà ed alla presunta natura di questi raggi. Mentre essi non producono nessuna diretta azione nell' organo visivo, si manifestano agevolmente cogli effetti da essi esercitati, e particolarmente per la loro azione fotografica e fosforogenica. Essi infatti agiscono sui preparati fotografici in modo simile alla luce, e rendono luminosi molti corpi. Un corpo qualunque posto sul loro cam-

mino li assorbe in parte, ragione per cui se al di là del corpo stesso è collocata una lastra fosforescente, appare su di questa un'ombra del corpo posto sul loro cammino. Una simile ombra si ottiene, se in luogo della lastra fosforescente s'impiega una lastra fotografica; anzi l'uso di questa è preferibile quando l'intensità dei raggi sia piccola, giacchè col prolungare la durata dell'esperienza si ottiene l'effetto, anche quando questo sarebbe troppo debole per manifestarsi col corpo fosforescente. L'assorbimento del corpo interposto è sempre parziale, ed è generalmente tanto maggiore quanto più grande è la sua densità, senza che il diverso grado di trasparenza del corpo per la luce abbia influenza. Accade quindi che corpi assai trasparenti assorbano di più i raggi X di altri corpi che siano completamente opachi. Ne risultò la ben nota applicazione di detti raggi per rendere visibili le ombre di certe parti interne del corpo umano. Così se fra il tubo da cui emanano i raggi del Röntgen ed una lastra fosforescente od una lastra fotografica si colloca la mano, si ottiene sulla lastra

l' ombra di questa, ma in mezzo a quest' ombra se ne vede una più marcata prodotta dalle ossa, in quanto che le parti ossee assorbono maggiormente i raggi.

La forma, posizione e grandezza delle ombre rivelano, che i raggi X si propagano in linea retta partendo dal corpo colpito dai raggi catodici. Mercè le ombre stesse si è poi riconosciuto, che i raggi Röntgen non sono nè riflessi, nè rifratti, nè presentano molti altri caratteri specifici delle vibrazioni trasversali luminose.

Infine si è dimostrato, che ogni corpo colpito dai raggi di Röntgen emette in ogni direzione nuovi raggi, parte dei quali, pur presentando gli stessi caratteri, si distinguono dai raggi incidenti in ciò, che più abbondantemente sono assorbiti dai varî corpi, e diconsi raggi *secondari.* Una differenza dello stesso genere esiste del resto fra i raggi prodotti da diversi apparecchi di scarica, e può dirsi in via generale, che minore è la rarefazione del gas in questi contenuto, e più i raggi X generati si avvicinano ai raggi secondarî, in quanto al loro assorbimento per parte dei varî corpi.

Insieme ai raggi X secondarî, un corpo colpito dai raggi di Röntgen ne emette altri, che non sono che raggi catodici dotati di velocità minori di quelle dei raggi catodici usuali (6).

Molti supposero dapprincipio, che i raggi di Röntgen fossero la manifestazione di onde longitudinali dell' etere, onde cioè dovute a vibrazioni, non già trasversali come quelle della luce, ma giacenti sulla direzione della propagazione. Oggi però tutto rende oltremodo verosimile una opinione diversa, e cioè che i detti raggi siano la manifestazione di onde trasversali dell' etere, come quelle che costituiscono la luce, ma senza sensibile periodicità, e perciò paragonabili, non ad onde sonore, ma piuttosto ad onde d' esplosione. La causa presunta di queste brusche perturbazioni verrà fra poco indicata. In appoggio di questa opinione sta il fatto, che la velocità di propagazione dei raggi X è sensibilmente eguale a quella della luce (7).

Per render ragione dei fenomeni prodotti dai raggi catodici il Crookes emise la sua ipotesi della materia radiante.

Già fin dal 1816 il celebre Faraday (8) aveva accennato alla possibilità d'un quarto stato della materia, come conseguenza di un ipotetico cambiamento « che oltrepassi l'evaporazione di tanto, di quanto questa oltrepassa la fluidità »; e meglio ancora chiariva il suo pensiero, dicendo che « augurava colla più viva impazienza la scoperta di un nuovo stato degli elementi chimici ». Soggiungeva poi, e questo ha uno speciale interesse rispetto alla teoria che ci occupa, che « la scomposizione dei metalli, la loro ricomposizione, la realizzazione dell'idea altra volta assurda della trasmutazione » erano i problemi, che la chimica doveva risolvere.

Quando la scarica ha luogo in un gas molto rarefatto, delle particelle materiali minutissime ed elettrizzate negativamente partirebbero, secondo Crookes, dal catodo, perchè da esso violentemente respinte, e queste particelle, formanti un quarto stato della materia successivo allo stato gassoso, produrrebbero col loro urto gli effetti constatati, e costituirebbero colle loro traiettorie i raggi catodici. Si suppose di poi che quelle

particelle fossero gli stessi atomi del gas residuo, il quale, stante l' estrema sua rarefazione, presenta quelle nuove proprietà, che il noto radiometro di Crookes mette in evidenza colla rotazione del suo piccolo molinello.

Ma alcuni, fra cui l'illustre Hertz, preferirono considerare i raggi catodici come un fenomeno ondulatorio simile alla luce, ed avente origine nella superficie del catodo e sede nell' etere. Peraltro tale opinione dovette ben presto cedere di fronte ai risultati delle esperienze posteriori.

Così, mentre vari fisici, fra i quali il Sig. J. J. Thomson (9), al quale si debbono tante fortunate intuizioni relativamente alla natura e alle proprietà degli elettroni, e fra noi il Prof. Maiorana (10), riconoscevano che la velocità dei raggi catodici è sensibilmente minore di quella della luce, il Sig. Perrin (11) metteva in evidenza il trasporto di elettricità negativa da essi effettuato, e che può constatarsi anche quando i raggi catodici abbiano già attraversata una sottile lamina metallica, come fu dimostrato più tardi dal Sig. Lenard (12).

L'esperienza del Perrin si può fare con un tubo di scarica come quello della figura 10. Il catodo C è un dischetto di alluminio, e l'anodo $A\ B\ D\ E$ ha la forma di una scatola cilindrica con aperture circolari nel centro delle basi. Esso comunica col suolo, e nel suo interno contiene

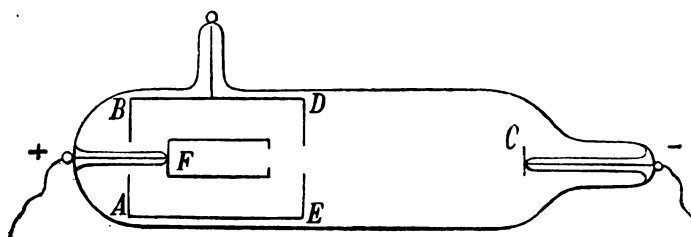



Fig. 10.

un conduttore F, che si mette in comunicazione con un elettroscopio. Il conduttore F suole avere la forma di un cilindro cavo, con un'apertura rivolta verso quella della base $D\ E$ dell'anodo. Quando le scariche passano nel tubo, si raccoglie nel conduttore F una carica negativa, la quale evidentemente non può essere dovuta ad altro che ad un trasporto effettuato dai raggi catodici. Del resto basta avvicinare una calamita, la quale, come si vedrà, rende curvilinei i raggi

catodici, onde essi più non entrino nel cilindro *A D*, ma rendano luminosa una regione eccentrica della base *D E*, che a questo scopo è ricoperta d'un corpo fosforescente. Orbene, non appena i raggi catodici cessano di colpire il conduttore *F*, questo cessa di ricevere elettricità.

Com'è naturale, la constatazione di questi fatti portò validissimo appoggio alla teoria del Crookes. Infine innumerevoli esperienze recenti di molti fisici indussero a modificare alcun poco e meglio determinare la primitiva ipotesi, e ad ammettere che le particelle, le quali col loro moto rapido costituiscono i raggi catodici, altro non siano che gli stessi elettroni negativi. Questa opinione, ora adottata da tutti, riposa principalmente sui fatti seguenti con accuratezza constatati, e dei quali dovremo intrattenerci dettagliatamente più oltre. In primo luogo, i raggi catodici hanno sempre identiche proprietà, qualunque sia il gas estremamente rarefatto nel quale si formano, e qualunque sia la natura del catodo; in secondo luogo le particelle negative in moto posseggono quella stessa piccolissima massa circa

un migliaio di volte minore di quella di un atomo d' idrogeno, a cui si giunge, come si è detto, collo studio del fenomeno di Zeeman, e che d'altronde si deduce pure da diversi altri fenomeni.

Ammesso che i raggi catodici siano elettroni in moto rapidissimo, anche la natura dei raggi di Röntgen rimane immediatamente definita. Come si vedrà meglio nell' ultimo Capitolo, ogni variazione brusca nella velocità d' un elettrone, produce nell' etere una perturbazione elettromagnetica, la quale si propaga tutt' intorno colla velocità della luce. Perciò la brusca diminuzione di velocità subìta dai raggi catodici, là ove incontrano un corpo qualunque, produrrà simili perturbazioni nell' etere, le quali si man - festeranno appunto come raggi X.

I raggi catodici possono prodursi anche senza ricorrere alle scariche elettriche. Così, per esempio, un corpo esposto all' azione dei raggi luminosi, o meglio ultravioletti, emette degli elettroni. Se il gas ambiente non è estremamente rarefatto, essi si uniscono ad atomi neutri e formano dei ioni negativi; ma se il gas è soppresso o quasi,

gli elettroni rimangono liberi e si allontanano dal corpo formando dei veri raggi catodici (13), dotati generalmente di velocità minori di quelle che si hanno nei tubi da scariche, e tanto più piccole, quanto più basso è il potenziale negativo del corpo illuminato (*).

La determinazione del rapporto fra la carica elettrica delle particelle costituenti i raggi catodici e la loro massa si basa principalmente sugli effetti prodotti da forze elettriche, o da forze magnetiche, effetti che bene si accordano coll'ipotesi ammessa. Se ne tratterà più diffusamente nel Cap. VII; ma intanto giova rilevare, che le particelle negative in moto debbono deviare dal loro cammino ordinariamente rettilineo, se su di esse agisce una forza elettrica; e che, siccome una particella elettrizzata in moto deve comportarsi in una maniera analoga ad una cor-

(*) Intorno ai fenomeni elettrici prodotti dalle radiazioni si consulterà utilmente un' ottima monografia del prof. Trautscholdt (14), nella quale trovasi altresì una completa bibliografia del soggetto, che risparmia a chi scrive di citare qui le ricerche proprie.

rente o meglio ad un elemento di corrente (vedi Cap. II), così la particella stessa deve deviare dal suo cammino, quando sia esposta all'azione di un campo magnetico. Tutto ciò fu direttamente constatato con opportune esperienze: anzi, per quanto riguarda l'azione d'un campo magnetico, non occorrono speciali apparecchi, bastando l'avvicinamento d'una calamita al tubo in cui si generano i raggi catodici per incurvarli a piacere.

CAPITOLO IV.

I ioni nei gas e nei solidi.

Negli elettroliti gli elettroni sono congiunti agli atomi neutri per formare ioni liberi, ed è il moto dei ioni che costituisce la corrente elettrica. Si ritiene oggi che altrettanto avvenga nei gas, e cioè che, allorquando questi corpi posseggono conducibilità elettrica, ciò si debba alla presenza di ioni ed al loro moto sotto l'azione delle forze elettriche. L'ipotesi della ionizzazione dei gas, che da molto tempo era da pochi sostenuta, è ora generalmente ammessa in seguito alle numerose esperienze di questi ultimi anni.

Si ritiene dunque che un gas contenga dei ioni liberi. Essi sono ordinariamente in così scarsa quantità, che la conducibilità che ne risulta è minima. Ma vi sono circostanze nelle

quali, per opera di una appropriata energia esterna, il gas è ionizzato, ossia molte delle sue molecole sono scisse in ioni positivi e negativi. Certi fatti sembrano poi indicare, che ai ioni possano unirsi atomi o molecole neutre, in modo da formare dei gruppi i quali, pur avendo la carica usuale dei ioni, posseggono masse molto maggiori di quelle che possono spettare ad un semplice ione.

Come nel caso dell'elettrolisi, la formazione dei ioni in un gas deve ritenersi dovuta alla dissociazione elettrica dei suoi atomi, cioè al separarsi da essi di uno o più elettroni negativi. Quanto rimane dopo l'allontanamento di questi è ciò che dicesi un ione positivo. I ioni negativi si formano poi per l'unione degli elettroni liberi ad atomi neutri; ma questa unione è tanto più rara quanto minore è la pressione del gas, per cui in un gas assai rarefatto molti se non tutti gli elettroni restano liberi. Sembra però che pei gas composti possa avvenire la dissociazione elettrica dalle molecole anzichè dai singoli atomi; per esempio che nel caso dell'anidride carbonica

si abbiano, quando questo gas è ionizzato, ioni positivi e ioni negativi d'anidride. Infatti non è provato che un gas composto dia ioni costituiti dagli elementi di cui è formato, come avviene invece per un elettrolita liquido (15), od almeno non è provato che ciò avvenga per tutte le molecole ionizzate.

Che la conducibilità elettrica dei gas sia dovuta alla presenza di particelle elettrizzate libere di muoversi fra le sue molècole, è la più naturale spiegazione dei fatti conosciuti ed in particolare dei seguenti.

Se un gas ionizzato si fa passare attraverso meati ristretti, per esempio attraverso un recipiente pieno di lana di vetro, o entro lunghi e sottili tubi metallici, o anche si fa gorgogliare attraverso un liquido conduttore (16), che però non contenga sostanze radioattive, esso perde la propria conducibilità. Lo stesso risultato si ottiene, se si fa passare il gas fra due conduttori oppostamente elettrizzati, in modo che esso serva da conduttore per la corrente. Nel primo caso il fatto si spiega per l'attrazione esercitata sui ioni dai

corpi presso i quali essi passano; nel secondo caso i due conduttori attraggono e trattengono i ioni aventi carica opposta alla loro, e così ne liberano il gas.

Anche il modo nel quale si comporta un gas ionizzato quando trasmette la corrente elettrica è in perfetto accordo colla ipotesi ammessa. Supponiamo di avere, per esempio, due dischi metallici paralleli, uno dei quali comunichi col polo isolato di una pila e l' altro con un elettrometro. Se si ionizza l' aria interposta facendola attraversare da raggi di Röntgen, e si fa variare la forza elettromotrice della pila, si riconosce che il gas non segue la legge ben nota di Ohm. Infatti l' intensità della corrente, misurata dalla carica che in un tempo fisso e determinato acquista il disco comunicante coll' elettrometro, cresce assai meno rapidamente della detta forza elettromotrice, e finisce coll' assumere un valore limite, che più non aumenta. Quando la corrente ha raggiunto questo valore, detto di saturazione, tutti i ioni generati dai raggi di Röntgen in un dato tempo (o in generale prodotti da quella causa

di ionizzazione che si impiega) sono utilizzati a trasmettere la corrente nel tempo medesimo. Un aumento di forza elettromotrice a nulla giova, non essendovi un maggior numero di ioni disponibili.

Infine anche un curioso fenomeno riscontrato da chi scrive (17), confermato e rettamente interpretato dai sig. J. J. Thomson e E. Rutherford, riceve dall' ammessa teoria la più ovvia spiegazione. Ecco di che si tratta. Se si fa variare la distanza fra i due dischi metallici considerati dianzi, varia pure l' intensità della corrente che attraversa l' aria ionizzata fra essi interposta, ma in senso contrario di ciò che si poteva supporre. Infatti, l' intensità della corrente cresce (ento certi limiti) col crescere della detta distanza. Ciò si spiega facilmente considerando che, coll' aumentare la distanza fra i dischi, si aumenta il volume della massa d' aria che prende parte al fenomeno, e per conseguenza anche il numero di ioni, che col loro movimento contribuiscono alla formazione della corrente di saturazione.

I ioni nei gas si muovono fra le molecole urtandole di frequente. Nuovi ioni potranno formarsi dalla scissione di molecole neutre, e ioni di opposto segno potranno ricostituire molecole. Questo ultimo fatto, cioè lo sparire dei ioni, ha luogo continuamente, ed è ad esso che si deve se, sotto l' azione di una causa ionizzatrice, il numero dei ioni non cresce al di là di un certo limite.

Se i ioni sono generati in un porzione sola del gas, essi si diffondono anche nella parte rimanente. Nei gas alla pressione ordinaria la velocità di diffusione è ordinariamente piccolissima in causa delle frequenti collisioni; ma se un campo elettrico agisce, la velocità di diffusione dei ioni divien grande, e fu trovata, la prima volta che una misura di questo genere venne fatta (18), di parecchie decine di metri al secondo.

I raggi ultravioletti, i raggi catodici, i raggi di Röntgen, i raggi emessi dai corpi radioattivi, il riscaldamento sino a temperatura abbastanza elevata, sono altrettante cause di ionizzazione. Questa è più o meno grande a seconda dei casi,

ed è limitata, come si è già fatto notare, da una continua ricomposizione di atomi e molecole neutre.

Ma vi è un' altra causa di ionizzazione, alla quale si riduce poi in realtà qualcuna delle precedenti, ed è l' urto dei ioni, come pure degli elettroni (dei quali probabilmente qualcuno esiste almeno transitoriamente allo stato libero anche in un gas alla pressione ordinaria) contro gli atomi o le molecole. Quando un ione possieda una velocità abbastanza grande, potrà fornire l' energia necessaria alla trasformazione di un atomo in ione positivo ed elettrone negativo, e quindi anche di una molecola in due ioni di segno opposto. Diciamo brevemente di questi varî modi di ionizzare un gas.

Le radiazioni luminose, e più specialmente le radiazioni ultraviolette, possono ionizzare i gas in due maniere. Se esse colpiscono un corpo solido o liquido, determinano una emissione di elettroni negativi, che ha per risultato la rapida scarica del corpo, se era elettrizzato negativamente, ed anche la formazione in esso di una

carica positiva, come venne riconosciuto da chi scrive (19). Di solito si fa l'esperienza coi metalli, perchè cogli elettroliti l'effetto è generalmente assai debole, ed i solidi isolanti meno si prestano alle determinazioni quantitative; e come radiazioni attive si impiegano quelle invisibili ultraviolette emesse dall'arco voltaico o dalle scintille elettriche, quantunque per certi corpi, come i metalli alcalini e lo zinco amalgamato, diano un effetto marcato anche i raggi visibili. Se poi il campo elettrico determinato dalla carica negativa del corpo è abbastanza intenso, gli elettroni negativi, da esso emessi, possono acquistare sufficiente velocità per ionizzare col loro urto gli atomi neutri.

Ma anche direttamente le più rifrangibili radiazioni ultraviolette, generate dalle scintille elettriche, producono la ionizzazione dei gas che esse attraversano, come ha dimostrato il signor Lenard (20) facendo passare nella vicinanza di corpi elettrizzati le radiazioni emesse da scintille scoccanti fra fili di alluminio. Questi corpi si scaricavano press'a poco colla stessa

rapidità, fossero essi carichi di elettricità positiva o di negativa, e qualunque fosse la loro natura e lo stato della loro superficie. Tutto ciò non poteva attribuirsi ad una azione di superficie, ma bensì ad una sulla massa dell'aria attraversata dalle radiazioni, e precisamente alla ionizzazione da queste prodotta. Un' esperienza, che può ripetersi anche con altri mezzi di ionizzazione, confermò quella spiegazione. Essa consiste nel far fluire l' aria in modo che, dal luogo ove è ionizzata, si porti in altro luogo, ove in virtù della conducibilità che per un certo tempo essa conserva, determina lo scaricarsi di corpi elettrizzati. Basta intercettare le radiazioni perchè l' effetto cessi di prodursi.

Sembra che solo le più rapide vibrazioni ultraviolette producano in modo sensibile la ionizzazione diretta dei gas. Infatti non riescono le esperienze descritte che quando il cammino percorso nell' aria dalle radiazioni si riduce a pochi centimetri, ed è noto che le più rifrangibili radiazioni ultraviolette sono rapidamente assorbite dall' aria all' ordinaria pressione.

I raggi catodici, che altro non sono, come si è visto, che elettroni negativi in movimento, ionizzano i gas, come fra poco sarà spiegato con qualche dettaglio.

Quanto ai raggi di Röntgen, i quali, come si è detto, verosimilmente sono la manifestazione di perturbazioni eteree generate da brusche variazioni di velocità degli elettroni, la ionizzazione dei gas da essi prodotta sembra dovuta all' impulso elettrico repentino prodotto sugli elettroni degli atomi gassosi.

Infine, l' elevazione di temperatura, che equivale ad un aumento delle velocità atomiche, e verosimilmente anche delle velocità con cui vibrano gli elettroni negativi, tende naturalmente a liberare questi ultimi dal loro legame colla parte positiva dell' atomo. Un filo metallico arroventato ionizza il gas che lo tocca, ed i gas delle fiamme mostransi sempre fortemente ionizzati.

Affinchè le molecole d' un gas restino ionizzate dall' urto dei ioni che in esso già esistono, è generalmente necessario esporre il gas all' azione di forze elettriche abbastanza intense.

In un campo troppo debole i ioni, pur obbedendo alla forza elettrica, non acquistano fra un urto e l'altro una velocità sufficiente, e l'effetto degli urti si riduce allora a mantenere costantemente piccola la detta velocità, giacchè naturalmente una parte dell'energia di moto dei ioni è comunicata alle molecole urtate. In tali circostanze i ioni devono continuamente muoversi press'a poco nella direzione stessa della forza che li sollecita. I fenomeni detti di *ombre elettriche* ed altri analoghi, dei quali troverà il Lettore una parziale descrizione in altro luogo (21), ne sono l'immediata conseguenza. Essi mettono in evidenza il moto ordinato dei ioni lungo le linee di forza elettrica, cioè secondo certe linee aventi la proprietà caratteristica di avere come tangente in uno qualunque dei loro punti la direzione della forza elettrica che agisce nel punto medesimo. Certe esperienze, nelle quali si fa diminuire gradatamente la pressione del gas, mettono anche meglio in chiaro il meccanismo con cui quelle ombre si formano. Si constata infatti (22), che al diminuire della pressione le

traiettorie percorse dai ioni si differenziano di più dalle linee di forza, tendendo a trasformarsi in quelle traiettorie sensibilmente rettilinee, che sono i raggi catodici. In altre parole, si passa per gradi dalle ombre nell' aria alla pressione ordinaria a quelle che si producono col tubo ben noto del Crookes. La cosa del resto era facile a prevedersi riflettendo, che col progredire della rarefazione gli urti dei ioni contro le molecole divengono sempre meno frequenti, e che è a questi urti che si deve il fatto, che le velocità dei ioni rimangono piccole quando il gas è alla pressione ordinaria, di modo che ad ogni istante essi si muovano sensibilmente nella direzione della forza agente su di essi.

Ma quando sul gas agisce un campo elettrico d' intensità abbastanza grande, la ionizzazione per urto ha luogo, ed è su di essa che si fonda ora una soddisfacente spiegazione dei fenomeni complessi e svariati delle scariche elettriche. Il riferirla qui esattamente ci farebbe uscire dai limiti assegnati a questo Capitolo; ma in vista

di ciò che segue è utile accennarla per qualche caso speciale fra i meno complicati.

Addottando, come oggi generalmente si fa, il vocabolo di corrente elettrica per indicare ogni passaggio di elettricità da un corpo ad un altro, è necessario anzitutto osservare, che di tali correnti se ne possono avere di due specie, secondo che, oltre ai necessari corpi elettrizzati o elettrodi ed ai corpi attraverso cui l'elettricità si propaga, occorre o no far intervenire qualche influenza esterna. Le correnti elettriche che si producono fra conduttori quando si ionizza il gas che li separa, appartengono alla prima specie, giacchè occorre un'azione ionizzatrice, per esempio raggi Röngten, luce ultravioletta, etc., per rendere conduttore il gas e dar luogo così al fenomeno di corrente. Le scariche elettriche sono correnti della seconda specie, giacchè esse possono generarsi senza alcun intervento straniero. Le correnti di questa specie possono dirsi *spontanee* o forse meglio *autonome*, e allora si diranno *non autonome* quelle della prima specie.

Le scariche sono correnti autonome generalmente di breve durata, che si producono improvvisamente ad un certo istante, quando si caricano di più in più due conduttori oppostamente elettrizzati. Esse hanno per risultato la neutralizzazione parziale o completa delle cariche dei due conduttori, e consistono in un fenomeno complesso, che per gli effetti che produce è in pari tempo meccanico, calorifico, luminoso e spesso ancora d'indole chimica, e la cui causa prima va cercata nel movimento dei ioni contenuti nel gas, entro il quale il fenomeno si svolge.

Come si è osservato altrove, dei ioni liberi esistono sempre nel gas, quantunque ordinariamente in quantità trascurabile o quasi. Quando le cariche opposte degli elettrodi sono ancora deboli, quei ioni, attratti dall'uno o dall'altro dei due conduttori, secondo che si tratti di ioni positivi o negativi, vengono sottratti al gas senza che nuovi ioni prendano origine. Ma se, come supporremo, le cariche degli elettrodi vengono continuamente aumentate, la forza elettrica agente sui ioni diviene sempre più intensa, e sempre

maggiore diventa la velocità che essi possono riacquistare dopo ogni urto, prima che un nuovo urto avvenga. Ben presto questa velocità sarà sufficiente perchè le molecole urtate dai ioni rimangano ionizzate, e cioè ridotte anch' esse a ioni delle due specie, i quali alla loro volta coi loro urti ne genereranno dei nuovi.

Si comprende dunque facilmente che, dall' istante in cui comincia la ionizzazione per urto, il fenomeno cambia natura, e per così dire, da pacifico diviene d' un tratto violento. Da quell' istante infatti il numero di ioni aumenta con crescente rapidità, gli urti divengono di più in più frequenti e poderosi, e le quantità di elettricità che i ioni recano in un intervallo di tempo di determinata grandezza agli elettrodi divengono di più in più grandi. Tutto ciò continuerà sino alla neutralizzazione delle cariche degli elettrodi. La produzione di luce e calore, che caratterizza la fase finale e costituisce la scarica visibile, si spiega come la manifestazione delle vibrazioni prodotte negli atomi dagli urti più violenti. In generale infatti dovrà ammettersi, che ove un

gas è reso luminoso dalla scarica, si abbia il maggior numero di urti e quindi la più abbondante ionizzazione.

Per quanto generica ed incompleta, da questa spiegazione chiaramente risulta, che il fenomeno visibile della scarica debba essere preceduto da un periodo preparatorio, durante il quale esiste fra gli elettrodi un moto accelerato di ioni. Tale periodo preparatorio fu constatato da molto tempo, e produce certi fenomeni, di cui non è qui il caso di parlare (23).

È invece necessario considerare con maggior dettaglio un caso particolare di scarica, quello cioè della scarica in un gas molto rarefatto, e render conto della formazione dei due strati di luce negativa, dello spazio oscuro, dei raggi catodici, etc.

In un gas rarefatto esistono verosimilmente elettroni liberi anzichè ioni negativi, insieme naturalmente a ioni positivi, sempre ben inteso in numero estremamente esiguo, se il gas non è esposto a nessuna delle note cause di ionizzazione. Può darsi inoltre che elettroni negativi

siano emessi dagli elettrodi metallici, spontaneamente o per effetto di radiazioni o altro. In ogni modo, fra elettrodi oppostamente elettrizzati avverrà nel gas un moto simile a quello descritto or ora, e di più in più accelerato, se le cariche degli elettrodi vanno crescendo. Gli elettroni negativi, i quali si muovono certamente verso l'anodo, acquistano rapidamente tale velocità, da divenir capaci di ionizzare per urto le molecole del gas a qualche distanza dal catodo, dando origine così al secondo strato negativo o bagliore. Questo bagliore è dunque una regione del gas ove avviene ionizzazione per opera degli elettroni negativi. I ioni positivi creati in tal modo saranno spinti dalla forza elettrica verso il catodo, ed in prossimità di questo possiederanno la velocità che loro occorre per ionizzare le molecole gassose, da cui la formazione del primo strato di luce negativa.

Gli elettroni prodotti in questa regione si muoveranno allontanandosi dal catodo, di guisa che le due regioni di ionizzazione forniscono l' una all' altra i ioni o gli elettroni occorrenti. Lo spazio

oscuro del catodo non è altro dunque che lo spazio percorso dagli elettroni costituenti i raggi catodici, e sopratutto dai ioni positivi che si muovono verso il catodo, prima che acquistino le velocità necessarie per produrre la ionizzazione.

Seguiamo per un momento ancora gli elettroni negativi i quali, dopo aver dato origine al bagliore negativo, proseguono il loro cammino verso l'anodo. Sollecitati continuamente dalla forza elettrica, la loro velocità in breve cresce di nuovo, e, percorso un certo intervallo, che è poi lo spazio oscuro di Faraday, ionizzano le molecole del gas, dando origine alla luce positiva.

A seconda dei casi questa luce, o si estende sino all'anodo, o appare invece suddivisa in istrati (scarica stratificata) separati da spazi relativamente oscuri. Di questi strati si può forse rendere ragione ammettendo, che gli elettroni, in causa dei loro urti contro le molecole gassose, perdano tanta della loro velocità, da divenir necessario un ulteriore loro cammino verso l'anodo per divenire nuovamente atti alla ionizzazione. Si formerà in tal modo un secondo strato lumi-

noso separato dal primo, dopo di che potranno formarsi in modo analogo altri strati.

Ma è per noi assai più utile il tener dietro ai ioni positivi, che si muovono verso il catodo, giacchè arriveremo a render conto della formazione di nuovi raggi, ai quali fu dato dal signor Goldstein il nome di *raggi-canale*, per la ragione che essi furono da lui ottenuti in modo particolarmente notevole impiegando un catodo forato da sottili canaletti. I ioni positivi, dopo aver dato origine nel modo descritto allo strato di luce negativa attiguo al catodo, o sono da questo catturati, o restano neutralizzati da elettroni, o infine danno luogo ai nuovi fenomeni. Questo ultimo caso si verifica per quei ioni che si trovano possedere, dopo l'ultimo urto, una velocità, obliqua rispetto alla direzione della forza elettrica, ed abbastanza considerevole per girare il contorno del catodo o attraversare un foro in esso praticato. Questi ioni proseguono a muoversi al di là del catodo, in virtù della loro velocità, sino ad una certa distanza, formando dei raggi *positivi* o *anodici*, ossia i raggi-canale,

precisamente come gli elettroni più veloci formano i raggi catodici, i quali si estendono spesso al di là del bagliore nella colonna di luce positiva.

Un campo elettrico od un campo magnetico fanno deviare i raggi positivi, ma in senso opposto a quello che si verificherebbe coi raggi catodici; è di qui appunto che si deduce essere tali raggi costituiti da particelle in moto elettrizzate positivamente. La deviazione peraltro è notevolmente più piccola, a parità di circostanze, per i raggi positivi, che per i raggi catodici, ed è di tal misura da dimostrare, che le particelle in moto non hanno una piccolissima massa, come nel caso dei raggi catodici, ma una massa di grandezza paragonabile a quella degli atomi e dei ioni elettrolitici. Si ha dunque a che fare con ioni e non con elettroni positivi, anche probabilmente con gruppi di maggior massa. Ad onta di ciò i raggi positivi posseggono alcune delle proprietà dei raggi catodici, e cioè ionizzano, come si è visto, i gas, eccitano la fosforescenza di certi corpi, ecc.

Ammesso che la conducibilità elettrica sia un fenomeno di trasporto tanto nei gas quanto nei liquidi, diventa sempre più naturale l'analoga ipotesi pei conduttori solidi, già enunciata nel Capitolo I. E poichè solo per gli elettroni negativi e non per quelli positivi si possiede finora la prova della loro esistenza libera, cioè senza unione con particelle materiali, così si ritiene probabile, che la corrente elettrica in un conduttore consista (almeno principalmente) nel moto di elettroni negativi.

Si disse già che gli atomi metallici si ionizzano con grande facilità dando luogo a ioni positivi ed elettroni negativi liberi. Perciò è naturale il supporre, che un metallo sia costituito da atomi neutri, da atomi privati di uno o più elettroni, e cioè ioni positivi monovalenti o plurivalenti, e infine da elettroni negativi, i quali vagheranno negli spazi interatomici, come le molecole di un gas nel recipiente che lo contiene. A ciascun istante accadrà, che qualche elettrone giunga presso un ione positivo in circostanze favorevoli alla loro riunione, e così si

ricostituisca un atomo neutro, come pure che qualche altro atomo subisca la dissociazione elettrica; ma cionondimeno, per la naturale compensazione fra i due opposti eventi si avrà uno stato di cose permanente nel suo complesso. Se il metallo non è sede di corrente elettrica, la somma degli spostamenti degli elettroni valutata secondo una direzione qualunque rimarrà nulla; nel caso opposto si avrà un efflusso d'elettroni verso una determinata direzione, che è quella opposta alla direzione convenzionalmente attribuita alla corrente elettrica. Naturalmente ogni singolo elettrone potrà avere ad un dato istante una direzione di moto qualunque; ma nel complesso avranno prevalenza gli spostamenti degli elettroni verso quella determinata direzione. E questo vale naturalmente anche per gli elettroni che stanno per liberarsi da atomi, e per quelli che stanno per ricostituire atomi neutri unendosi a ioni; tanto che può dirsi, che la corrente elettrica è dovuta agli elettroni che, passando da un atomo ad un altro più o meno lontano, si spostano prevalentemente in una determinata direzione.

Del resto, che i metalli non offrano un insormontabile ostacolo al moto degli elettroni, lo mostra il fatto constatato della loro permeabilità per i raggi catodici.

Anche i ioni positivi contribuiranno in lieve grado a costituire la corrente elettrica, qualora abbiano sufficiente mobilità, che permetta loro di obbedire alle forze elettriche.

Questo modo di considerare la struttura dei metalli ha il pregio di prestarsi alla spiegazione di numerosissimi fenomeni conosciuti. Ecco alcuni esempî.

È ammesso da Volta in poi, benchè nessuna delle spiegazioni date di questo fatto sia stata universalmente accettata, che basta mettere a reciproco contatto due metalli, perchè essi assumano cariche elettriche opposte; ma si renderà conto di questo fenomeno fondamentale considerando, che pei diversi metalli è diversa la dissociabilità elettrica, e sono quindi verosimilmente diversi il numero e la velocità media degli elettroni liberi in essi contenuti; per cui, non appena siano in contatto diretto, un certo numero di

elettroni passerà dall' uno all' altro, precisamente come passa una certa quantità di gas da un recipiente ad un altro, quando la pressione sia in essi differente. Il passaggio degli elettroni cesserà naturalmente allorchè la forza elettrica dovuta alle opposte cariche acquistate dai due metalli, la quale naturalmente tende ad opporsi a quel passaggio, avrà raggiunto un determinato valore.

Anche nei non metalli, e in generale in tutti i corpi, potranno prodursi analoghi fenomeni in iscala ridotta, e ciò spiegherà l'elettricità di contatto fra corpi qualunque, e quindi anche la produzione delle cariche per strofinamento.

Se il metallo è messo in contatto d'un liquido, in cui i suoi sali siano solubili e passibili di elettrolisi, una parte dei ioni positivi contenuti nel metallo passerà nel liquido. Risulta infatti dalla teoria dell' elettrolisi, che mentre un metallo non è solubile nell' acqua, un ione metallico positivo può invece essere considerato come atomo d'un corpo solubile, giacchè una soluzione salina è sempre in parte dissociata nel modo conosciuto.

Anche in tal caso il passaggio di ioni positivi dal metallo al liquido si arresterà, allorchè la carica positiva del liquido stesso e quella negativa del metallo avranno raggiunto un determinato valore. Si rende conto così delle cariche di contatto fra metalli ed elettroliti, e si dà una forma ben precisata al concetto della *tensione di soluzione* dei metalli, posta dal Nernst a base di una soddisfacente teoria della pila voltaica.

Anche le proprietà termiche dei metalli sono quali l'esposta ipotesi potrebbe far prevedere. Così la loro notevole conducibilità calorifica dipende dal fatto, che l'energia termica in essi contenuta non è solo energia di moto dei loro atomi, ma in buona parte energia di moto degli elettroni liberi. Le grandissime velocità di questi compensano l'esiguità delle loro masse, e in pari tempo rendono assai rapida la trasmissione dell'energia termica da parti calde a parti fredde del metallo.

Infine, se si tiene conto dell'azione deviante, che un campo magnetico esercita sugli elettroni

in moto, si rende ragione facilmente, almeno nel loro generale andamento, di certi fenomeni scoperti in epoca relativamente recente, dei quali è utile tener parola.

Si abbia una sottile lamina metallica di forma rettangolare percorsa nel senso della sua lunghezza da una corrente elettrica, e si connettano ai reofori d'un galvanometro due punti della lamina presi in luoghi fra loro simmetrici rispetto all'asse longitudinale di essa, per esempio a metà dei suoi lati più lunghi. Per motivo evidente di simmetria, nel circuito del galvanometro non passerà nessuna corrente, e l'ago del medesimo resterà allo zero.

Ciò posto, si porti la lamina fra i poli d'una potente elettrocalamita in modo che la forza magnetica risulti perpendicolare al suo piano. Immediatamente lo strumento devierà, per la *corrente di Hall* che in tal caso prende origine, e che è così chiamata dal nome del suo scopritore. Essa cambia direzione sia invertendo la direzione della corrente nella lamina, sia invertendo la polarità magnetica dell'elettrocalamita.

Quand' anche si adoperino lamine sottilissime (per esempio foglie d' oro) e campi magnetici intensi, la corrente di Hall è generalmente debolissima; ma chi scrive ebbe la fortuna di constatare, che il fenomeno di Hall diventa assai cospicuo adoperando una laminetta di bismuto, tanto che riescì ad ottenerlo per opera del campo magnetico creato da un ago da cucire calamitato, o anche per opera del magnetismo terrestre (24).

Secondo l' ipotesi ammessa, la spiegazione del fenomeno di Hall è semplicissima. Gli elettroni in moto costituenti la corrente saranno infatti deviati dalla forza magnetica, come lo sono quelli costituenti i raggi catodici, e perciò affluiranno in maggior numero verso uno dei lati della lamina facendo cessare così la primitiva simmetria, d' onde la corrente osservata.

È necessario però mettere qui in chiaro, che questa spiegazione porterebbe ad ammettere l' esistenza anche di elettroni positivi liberi, ed a supporre che, almeno in certi casi, essi pure intervengano attivamente nel formare la corrente elettrica nei conduttori solidi.

Infatti vi sono dei corpi, i quali danno luogo ad un fenomeno di Hall di senso inverso a quello presentato dall'oro, dal bismuto, etc. A parità di direzione del campo magnetico e della corrente nella lamina, la corrente di Hall ha dunque per questi corpi la direzione opposta a quella che si osserva coi metalli nominati più sopra. Per questi corpi adunque la corrente elettrica sembra consistere prevalentemente in un movimento di elettroni positivi, naturalmente secondo direzione opposta a quella attribuita ai supposti elettroni negativi. Anzi sarebbe da supporre logicamente, che la corrente si debba al moto simultaneo degli elettroni delle due specie in direzioni contrarie, con prevalenza d'effetto in favore degli uni o degli altri a seconda della natura del conduttore in cui la corrente elettrica ha sede.

Essendo tuttavia questa l'unica circostanza nella quale si mostrerebbero attivi e liberi gli elettroni positivi, è forse preferibile cercare qualche diversa spiegazione pel fenomeno di Hall, la quale permetta di considerare sempre la corrente elettrica come unicamente dovuta agli elettroni

negativi. Sembra intanto a chi scrive, che non sia lecito il non tener conto della presenza dei ioni positivi e degli atomi non ionizzati, e sopratutto il non tener conto delle modificazioni che il campo magnetico verosimilmente produrrà in questi atomi e ioni, non fosse altro che trasformandoli temporaneamente in calamite. L'azione magnetica di queste è naturalmente inversa, in certe regioni, a quella del campo principale. Se oltre che di questa circostanza si tiene conto anche del fatto, che gli atomi devono esercitare altre azioni (particolarmente elettriche) sugli elettroni in moto, si resta facilmente persuasi della possibilità di trovare una soddisfacente spiegazione del comportamento anomalo presentato da certi corpi relativamente al fenomeno di Hall, senza abbandonare l'ipotesi secondo la quale ai soli elettroni negativi si deve attribuire la corrente elettrica.

Mercè il bismuto, che in modo così speciale sembra permettere agli elettroni in esso contenuti di obbedire alle forze magnetiche, si misero in luce altri fenomeni, la cui spiegazione è molto

simile a quella data più sopra pel fenomeno di Hall.

Così l'affluire verso un lato della lamina degli elettroni deviati dalla forza magnetica avrà per conseguenza un maggior accumulo di energia presso quel medesimo lato, e quindi una differenza di temperatura fra le parti attigue ai lati lunghi della lamina. Inoltre dalla stessa deviazione degli elettroni risulterà naturalmente un minor afflusso di essi verso il lato breve della lamina dal quale essi la lasciano, e perciò un apparente aumento della resistenza elettrica della medesima, come pure un apparente diminuzione della sua conducibilità calorifica. Il primo di questi fenomeni venne dimostrato dallo scrivente nel caso del bismuto (25).

Infine una serie parallela di quattro fenomeni analoghi a quello di Hall, e agli altri tre or ora rapidamente accennati, si avrà, sostituendo alla corrente elettrica una corrente termica, cioè mantenendo a temperature differenti le due estremità della lamina, in modo che essa sia percorsa nel senso della sua lunghezza da un flusso calorifico.

Questo infatti è in parte dovuto a maggior velocità degli elettroni nella direzione che va dall'estremo caldo a quello freddo, e questi elettroni sono deviati dal campo magnetico come quando si tratta di elettroni costituenti la corrente elettrica. Così, per esempio, si produce distintamente un fenomeno in tutto analogo a quello di Hall, ma nel quale le variazioni di temperatura o il flusso di calore tengono il posto delle correnti elettriche (26), come pure si verifica la diminuzione di conducibilità calorifica prodotta dal campo magnetico (27).

Senza entrare in ulteriori dettagli, si può aggiungere, che la precedente ipotesi sulla natura della corrente permette di render conto assai bene di diversi altri fatti noti, come ad esempio l'essere fra loro proporzionali la conduttività calorifica e quella elettrica nei varî corpi, e di spiegare varî fenomeni come quelli relativi alle proprietà ottiche dei metalli. Cosicchè anche in questo ordine di fenomeni la teoria degli elettroni, non solo non trova contraddizioni, ma si mostra atta a fornirne una semplice rappresentazione.

CAPITOLO V.

La radioattività.

La scoperta dei così detti raggi X, fatta conoscere dal prof. Röntgen nel principio del 1896, diede occasione a numerose ricerche intorno alla possibile esistenza di altre radiazioni capaci di agire sulle lastre fotografiche e di attraversare i corpi opachi.

Effetti di questo genere furono descritti dal sig. Lebon; ma non se ne terrà qui parola, essendosi riconosciuto che tali effetti, attribuiti da quello sperimentatore ad una nuova radiazione da lui chiamata *luce nera*, provenivano, il più delle volte almeno, da cause non aventi intima relazione col soggetto da trattarsi ora.

Hanno invece attinenza alla radioattività certe esperienze fatte dal sig. Henry (28) col solfuro di

zinco fosforescente, dal sig. Niewenglowski (29) col solfuro di calcio, e dal sig. Becquerel (30) col solfato doppio di uranio e potassio, dalle quali risultava, che questi corpi emettono raggi capaci di agire sopra una lastra fotografica attraversando corpi opachi, allorchè se ne ecciti, colla luce o coi raggi X, la fosforescenza.

Nell' istituire le sue esperienze il Becquerel aveva uno scopo speciale. Si sapeva già che i raggi X avevano origine dalla parete situata di fronte al catodo e colpita dai raggi catodici, che in pari tempo la rendevano luminosa; era quindi naturale supporre, che la fosforescenza e l'emissione dei raggi X fossero fenomeni fra loro connessi, ciò che poi si è riconosciuto essere insussistente. Il sig. H. Becquerel voleva dunque ricercare se corpi resi fosforescenti, non più dai raggi catodici ma dalla luce, emettessero dei raggi X. E siccome questi raggi possono impressionare una lastra fotografica, anche se è circondata da corpi opachi, così il fisico francese collocò sopra una lastra, in tal modo difesa dalla luce, varî corpi, ed espose il tutto alla luce del

sole. Dopo alcuni insuccessi egli ottenne un effetto sicuro con solfato doppio di uranio e potassio in forma di laminette cristalline, giacchè, sviluppando la lastra, vide una immagine delle laminette e l'ombra d'una moneta d'argento, che era stata posta al disotto di una di esse. Sembrava dunque che il fenomeno preveduto avesse luogo realmente. Ma accadde al Becquerel di ottenere il medesimo effetto anche con una scarsa illuminazione in giornate nuvolose, onde sospettò, che l'effetto stesso non dipendesse dall'azione della luce. Ed infatti ben presto verificò (31), che il sale d'uranio emetteva continuamente e spontaneamente dei raggi capaci di attraversare corpi opachi e di agire sui preparati fotografici, senza che occorresse esporlo alle radiazioni luminose.

Le successive ricerche dimostrarono (32) che i raggi del sale di uranio dividono coi raggi X, non solo le proprietà di attraversare corpi opachi, di agire sulle lastre fotografiche, di rendere luminosi i corpi fosforescenti, e, come si constatò poi, le proprietà negative di non essere passibili

di riflessione e di rifrazione, ma ancora un'altra proprietà, che fu riconosciuta ai raggi X poco dopo che furono scoperti (33), e cioè quella di ionizzare i gas che attraversano; donde un metodo di studio dei raggi di Becquerel più rapido del metodo fotografico, e che consiste nel misurare la velocità con cui si scarica un corpo elettrizzato, quando il gas che lo circonda è esposto all' azione di quei raggi.

Si può ricorrere per questo scopo ad un elettrometro qualunque posto in comunicazione con un disco metallico, che si trova a qualche distanza da un altro; e si può sperimentare in due modi. O si mette il secondo disco in comunicazione col suolo, ed allora si studia coll' elettrometro la velocità con cui diminuisce una carica elettrica ad esso cumunicata, quando l' aria interposta ai dischi è ionizzata dal corpo radioattivo. Oppure si dà una carica elettrica al secondo disco, ed allora si osserva con quale rapidità l' elettrometro devìa. Con corpi molto attivi si potrebbe ricorrere al galvanometro; invece, quando si

studiano corpi di radioattività debolissima, si dà la preferenza all' elettrometro a foglie d' oro, o meglio ad un elettroscopio ad una sola foglia, costituito semplicemente da un' asticella metallica verticale *A B* (fig. 11), alla sommità della quale è attaccata la sottilissima foglia d' oro o di alluminio *C D*. Per rendere sicuro l' isolamento l' asticella è sostenuta da un bastoncino di solfo *S*. La capacità elettrica del sistema conduttore *A B C D* è piccolissima, e perciò la diminuzione di divergenza della fogliolina *C D* non risulta troppo lenta. L' elettroscopio diventa poi elettrometro, se si osserva la posizione di *C D* con un microscopio munito di una scala oculare.

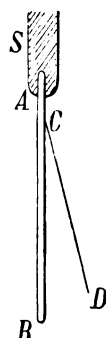



Fig. 11.

Chi scrive preferisce un elettrometro leggermente diverso, da questo divenuto classico per gli studi dei corpi debolmente radioattivi. L' isolatore di zolfo, oppure di quarzo fuso, *S* (fig. 12), è assai sottile e fissato con mastice o con guttaperca al fondo di una minuscola campanella

metallica connessa all'asticella *A B*. Questo modo di attacco evita od attenua il diffondersi della carica dell'asticella sulla superficie dell'isolatore. Inoltre l'autore, riprendendo una disposizione da lui stesso ideata molto tempo fa, sostituisce alla scala annessa all'oculare del microscopio una scala ordinaria a millimetri, posta a qualche metro dall'elettrometro. Una lente convergente acromatica forma un'immagine reale di quella scala nel piano in cui si muove la fogliolina metallica, per cui nel campo del microscopio o di un semplice oculare si vede simultaneamente e la fogliolina e la scala.

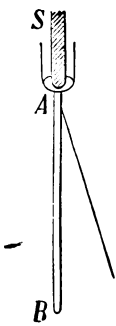



Fig. 12.

In uno degli elettrometri, costruiti da chi scrive, l'asticella e la foglia d'oro hanno appena $^1/_4$ delle dimensioni che mostrano nella fig. 12. Esso è particolarmente adatto alla dimostrazione della radioattività, giacchè basta accostare al medesimo un sale d'uranio, perchè i raggi da questo emessi, i quali penetrano nella cassetta contenente la foglia d'oro attraversandone una parete di sottilissimo alluminio, facciano scendere

a vista d'occhio la fogliolina in precedenza elettrizzata.

Per quanto sia già grandissima la sensibilità di questo istrumento, chi scrive ne ha costruiti altri di sensibilità anche maggiore (34), aventi la forma di minuscola bilancia di torsione con sospensione di filo di quarzo. Si può da essi ottenere una deviazione di due millimetri al secondo sopra una scala posta a due metri e mezzo di distanza, per azione di 15 milligrammi di bromuro di radio lontano quattro metri dallo strumento.

Merita poi speciale menzione un elettroscopio di nuovo genere, che non richiede nessuna scala (35). La fig. 13 ne mostra in grandezza naturale le parti essenziali. *T* è una foglia d'oro sospesa ad un isolatore *RS*, *QU* una sottile striscia metallica, piegata come mostra la figura e caricata da una pila secca. L'estremità *V* è acuminata, affinchè, quando la fogliolina *T* va a toccarla, non possa aderirvi. Quando si carica *U*, *T* è attratta e poi respinta, e conserva a lungo invariata la sua direzione incli-

nata. Ma quando si accosta un corpo radioattivo alla finestra, chiusa da una foglia d'alluminio, della cassetta metallica che circonda l'apparecchio, si vede subito la fogliolina abbassarsi sino a toccare la punta *U*. Immediatamente dopo il contatto la fogliolina è di nuovo respinta, indi riprende indefinitamente il proprio movimento. Il numero di battute che fa la fogliolina in ogni minuto secondo è proporzionale alla intensità della radiazione che ionizza l'aria intorno ad essa. Basta dunque contare le battute eseguite dalla fogliolina d'oro in un dato tempo per ricavarne una misura relativa della radioattività, il che è facile se il moto non è troppo rapido. Quanto alla sensibilità dello strumento si può osservare

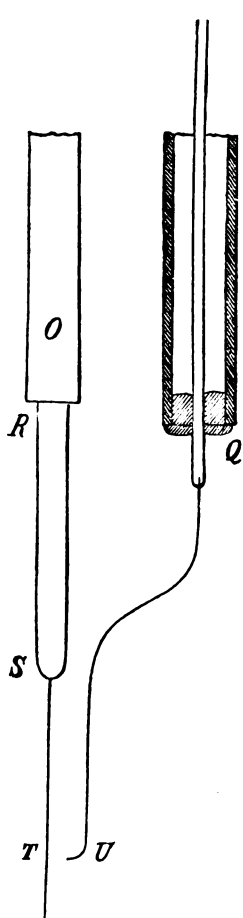



Fig. 13.

che un disco d'ossido di uranio di 6 cent. di diametro collocato presso lo strumento, la fa oscillare in modo da effettuare 11 battute in un minuto primo. La spiegazione del modo di agire di questo apparecchio è meno semplice di quanto pare a prima vista, e per essa rimando il Lettore alla citata pubblicazione.

Col moltiplicarsi delle esperienze si stabilì poi che sono *radioattivi*, ossia emettono raggi di Becquerel, tutti i composti di uranio, e che sono tali in ragione della quantità di uranio che essi contengono; ciò che dimostra essere la radioattività una proprietà dell'atomo dell'uranio, la quale si conserva inalterata, allorchè l'atomo stesso entra in combinazione con atomi d'altra specie chimica.

Come l'uranio, e ad un grado poco diverso, è radioattivo il torio, ciò che venne constatato indipendentemente dal sig. Schmidt (36) e dalla sig.[ra] Curie (37).

Ma difficilmente si avrebbe forse potuto studiare in modo più completo la radioattività, e determinare le modalità e le cause immediate pro-

babili di questo interessante fenomeno, o almeno tutto ciò avrebbe richiesto lungo tempo e accuratissime ricerche, se non si fossero scoperti certi corpi, la cui radioattività può dirsi centinaia e migliaia di volte maggiore di quella dell'uranio.

Accadde al signor e alla signora Curie di trovare certi campioni di calcolite e di pechblenda (segnatamente quella che si ricava a Joachimsthal) alquanto più attivi dell'uranio puro. Rammentando che la radioattività è proprietà atomica, il fenomeno non poteva essere attribuito ad uranio contenuto in quei minerali, e bisognava supporre la presenza in essi di una sostanza sconosciuta, più attiva dell'uranio stesso. Ricorrendo a metodi fisici e chimici di separazione, furono estratti da quei minerali certi composti di bismuto aventi una radioattività ben 400 volte maggiore di quella dell'uranio (38). Fu dato il nome di *polonio* all'incognita sostanza in essi contenuta, e la cui radioattività lentamente diminuisce coll'andar del tempo. Si vedrà più oltre che il polonio non è un nuovo elemento chimico, ma una trasformazione del *radio*, cioè

di un nuovo corpo estratto più tardi, sempre dalla pechblenda, dai coniugi Curie insieme al sig. Bémont (39). Questo radio è un corpo attivissimo, chimicamente analogo al bario e con questo associato quasi in ogni reazione. Un altro corpo radioattivo associato al torio e avente analogo comportamento chimico fu scoperto dal sig. Debierne (40), che lo chiamò *attinio*.

Altre sostanze notevolmente radioattive furono ricavate da diversi minerali, ma sopratutto dalla pechblenda, per opera di varî altri sperimentatori; ma tutto porta a credere che tali sostanze non contengano qualche altro nuovo elemento chimico. Così i signori Elster e Geitel (41) e più tardi il sig. Giesel (42) ed i signori Hofmann e Strauss (43) isolarono un solfato di piombo fortemente radioattivo; ma il supposto *radio-piombo* in esso contenuto è quasi sicuramente, non un nuovo elemento radioattivo, ma, come si vedrà più oltre, un prodotto di trasformazione del radio. Fu annunciato poi che il solfato di piombo attivo perde in certe circostanze buona parte della sua radioattività, per ricuperarla poi lentamente, e

che, se lo si espone all' urto dei raggi catodici, la proprietà radioattiva si ripristina in pochi minuti. Questa osservazione merita ulteriori conferme.

Più recentemente i signori Hofmann e Wolf (44) hanno in parte separato la sostanza attiva dal piombo inattivo, ed hanno annunciato che essa differisce dal polonio della sig.[a] Curie per la costanza della sua radioattività; ma altri constatarono, che la radioattività del radio-piombo decresce col tempo.

Anche il corpo chiamato *radio-tellurio* dal sig. Marckwald (45) rassomiglia nella sua proprietà al polonio, ed anzi si considera fondatamente come ad esso identico, giacchè si è riconosciuta non sussistente la asserita costanza di radioattività del radio-tellurio, la quale avrebbe stabilito fra i due corpi un carattere differenziale. Il radiotellurio si deposita su bastoncini di bismuto o di antimonio introdotti nella soluzione acida di cloruro di bismuto attivo. Da 850 gr. di questo sale il sig. Marckwald ottenne così circa 6 decigrammi di sostanza assai attiva.

Un bismuto attivo, assai simile a quello degli altri sperimentatori, fu ricavato dal sig. Giesel (46), che poi ne separò un prodotto identico a quello del Marchwald e quindi contenente polonio.

Del pari due supposti nuovi elementi radioattivi furono separati dal torio dal sig. Baskerville, che li chiamò *carolinio* e *berzelio* (47); ma sembra si tratti di prodotti identici a quelli ai quali il torio deve la sua attività.

Infine il sig. Giesel (48) estrasse dalla pechblenda un prodotto molto attivo, contenente un preteso nuovo elemento cui diede il nome di *emanio*. Secondo il sig. Rutherford (49) questo corpo sarebbe identico all' attinio, ed in seguito a recenti ricerche comparative i sig. Hahn e Sackur (50) giunsero alla stessa conclusione, mentre secondo il sig. Markwald (51) l' attinio sarebbe un prodotto di trasformazione dell' emanio.

Come si vede, regna ancora qualche incertezza intorno alla natura e alla stessa esistenza distinta di alcune delle sostanze radioattive, per cui può dirsi che la chimica dei corpi radioattivi non è che al suo inizio. Però l' esistenza del radio come

elemento chimico distinto è oggi accertata, ed anzi se ne conosce lo spettro caratteristico. Il radio non fu per anco ottenuto allo stato libero, ma se ne conoscono alcuni sali. Così la piccola quantità di sostanza radioattiva, che i signori Curie pazientemente seppero per la prima volta ricavare da più tonnellate di resìdui di pechblenda, che aveva servito per estrarne l'uranio, era costituita da cloruro di radio.

I detti residui contengono dei composti di quasi tutti i metalli, fra cui il bario, il bismuto, ed i metalli delle terre rare. Processi chimici, che troppo lungo sarebbe descrivere, permettono di ricavare separatamente il bario insieme al radio, il bismuto insieme al polònio, e le terre rare insieme all' attinio; dopo di che rimane a separare ciascuno dei corpi radioattivi dal corpo al quale va congiunto ad onta delle reazioni chimiche subìte. Questa separazione, alla quale la sig.ra Curie ha dedicato più anni di lavoro, è perfettamente riescita nel caso del radio col seguente processo.

Il cloruro di bario radifero, che si ricava nella quantità di circa 8 chilogrammi per tonnellata di residui di pechblenda, vien sciolto a caldo nell' acqua in modo da formarne una soluzione satura. Questa col raffreddamento lascia depositare dei cristalli che chiameremo *A*, mentre, facendo evaporare a parte la soluzione restante, se ne ricava altro cloruro che diremo *B*. Essendo il cloruro di radio un poco meno solubile di quello di bario, accade che il cloruro *A* è più ricco in radio e quello *B* più povero, del cloruro impiegato a fare la soluzione, ciò che si stabilisce esaminandone la radioattività rispettiva. Si procede allora ad una seconda eguale operazione tanto sul prodotto *A* che sul prodotto *B*, dopo di che si hanno quattro porzioni diversamente ricche di radio, che però si riducono a tre riunendo insieme la parte meno radioattiva ricavata da *A* colla più radioattiva ottenuta da *B*, le quali hanno sensibilmente lo stesso grado di radioattività. Si prosegue a lungo nello stesso modo; però, per non aumentare soverchiamente

il numero delle porzioni, si ha cura di non tener conto di quelle la cui radioattività è piccolissima, e di cessare le operazioni su quelle la cui radioattività è assai elevata. È utile altresì servirsi dell'acqua madre raccolta in un'operazione per sciogliere i cristalli ottenuti nella successiva. Quando con questo processo si è eliminata la maggior parte della sostanza inattiva, lo si prosegue ancora, ma avendo cura di eliminare con minor parsimonia le parti meno attive. Così facendo si perderà un poco di radio, ma più rapidamente procederà la purificazione, per la quale conviene ora acidulare di più in più il solvente con acido cloridrico puro. Alla fine si arriva ad isolare del cloruro di radio sensibilmente puro nella quantità di due o tre decigrammi per tonnellata di residui impiegata. Si prepara oggi allo stato di purezza anche il bromuro di radio.

Oltre che la misura del grado crescente di radioattività, anche l'esame spettroscopico del prodotto potrebbe servire a valutarne la purezza. Il radio possiede infatti uno spettro, che lo caratterizza perfettamente, e che fu studiato dal signor

Demarçay; insieme a questo spettro appare quello del bario, se si esamina un prodotto impuro; ma col procedere della depurazione le righe di questo metallo si affievoliscono e alla fine spariscono quasi completamente.

Constatati i principali effetti dovuti ai corpi radioattivi, l'attenzione dei fisici fu rivolta allo studio diretto dei raggi emessi.

Le radiazioni conosciute sono, o almeno si ammette siano, di due specie, e cioè o dovute ad onde propagate nell'etere, o al movimento di particelle materiali elettrizzate. Appartengono alla prima specie, non solo i raggi luminosi propriamente detti, nonchè i raggi invisibili calorifici e i raggi invisibili ultravioletti, ma anche, secondo si ritiene, i raggi di Röntgen. Alla seconda specie appartengono i raggi catodici, che appunto si considerano dovuti al moto degli elettroni negativi.

Non è difficile decidere sulla natura di radiazioni nuove, che appartengano all'una o all'altra di queste due categorie. Infatti, mentre un campo elettrico od un campo magnetico non possono menomamente modificare la forma dei raggi lu-

minosi, di Röntgen, ecc., essi debbono incurvare sensibilmente le traiettorie percorse da particelle elettrizzate, salvo che la velocità di queste sia eccessiva. Si è peraltro creduto da alcuni alla esistenza di certe nuove radiazioni, alle quali il signor Blondlot diede il nome di raggi *N* (52), le quali, pur partecipando delle proprietà dei raggi calorifici, sarebbero dotate di altre proprietà assai strane. Di esse qui non intendo parlare, in quanto che la loro natura e la stessa loro esistenza sono ancora assai problematiche, tanto che i loro pretesi effetti vengono attribuiti dai più a causa soggettiva.

Per acquistare qualche nozione intorno alla natura dei raggi emessi dai corpi radioattivi era dunque necessario far agire su di essi forze magnetiche o forze elettriche, e perciò collocare il corpo radioattivo, o fra i poli di una calamita potente, o fra due lastre metalliche oppostamente elettrizzate. Inoltre, per riconoscere le possibili deformazioni dei raggi, occorreva farli passare per una stretta apertura praticata in un diaframma, e collocare al di là di questo un corpo

fosforescente oppure una lastra fotografica avvolta in carta nera per ripararla dalla luce, oppure un elettroscopio, se si vuol far uso del metodo elettrico. Col corpo fosforescente si vedrà lo spostamento della regione luminosa, se il campo elettrico o magnetico deforma i raggi, e lo stesso risultato si constaterà sviluppando la lastra. L'uso di questa sarà però generalmente preferibile, giacchè la durata della posa, che si può far lunga fin che si vuole, compenserà eventualmente la scarsa intensità delle radiazioni che si studiano. Infine, se si impiegherà l'elettroscopio, si potrà vedere, se i raggi, una volta deviati, vanno a ionizzare l'aria intorno allo strumento, se prima non lo potevano raggiungere.

Applicando questi metodi, si riconobbe dapprima, che in generale un corpo radioattivo emette raggi deviabili nel campo magnetico ed elettrico, e in pari tempo raggi non deviabili. Si constatò inoltre, che i primi si comportano in tutto come velocissimi raggi catodici, cioè come costituiti da elettroni negativi lanciati in linea retta con enorme velocità. Vedremo anzi più

oltre, che questa velocità può misurarsi, e che il rapporto fra carica elettrica e massa ha sensibilmente il valore stesso trovato nel caso dei raggi catodici.

Ricerche ulteriori hanno poi dimostrata la produzione, per parte del radio e degli altri corpi radioattivi, di altri raggi deviati dalle forze elettriche e magnetiche assai meno dei raggi catodici, ma in senso contrario, e confermata la produzione dei raggi non deviabili. Per ciò si può dire, che i corpi radioattivi possono emettere tre specie di raggi.

I raggi deviabili non si possono considerare che come costituiti dall' emissione di particelle elettrizzate. Il senso delle deviazioni fa conoscere il segno delle cariche, mentre la misura delle deviazioni stesse permette di valutare la velocità di cui le particelle sono dotate, come pure il rapporto che passa fra la carica e la massa di ciascuna di esse, e per conseguenza questa separatamente, se si ammette aver la carica elettrica quel costante valore che spetta ad ogni valenza atomica. Chiamando α, β, γ, col sig. Rutherford, le tre specie di raggi, che generano i corpi radioat-

tivi, ecco quanto intorno ad essi si ricava dalle ricerche fatte.

Il comportamento dei raggi α è tale, da confermare l'ipotesi del sig. Strutt (53), che li sup-

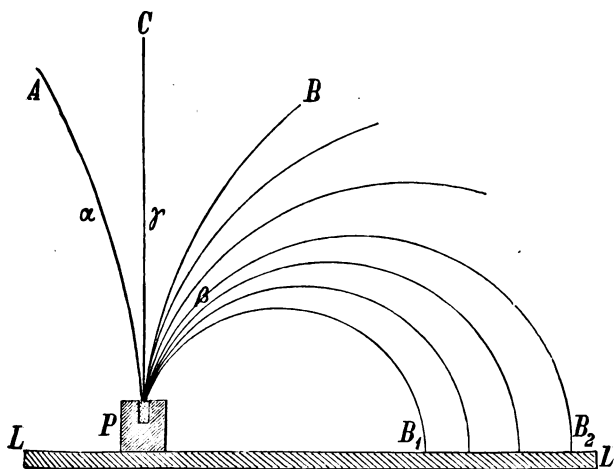



Fig. 14.

pose costituiti da ioni positivi lanciati in ogni direzione dai corpi radioattivi. Il sig. Becquerel constatò infatti (54), che un campo magnetico fa deviare i raggi α in senso inverso dei raggi catodici.

Se, per esempio, i raggi partono da una piccola quantità d'un sale di radio contenuta in un minuscolo recipiente di piombo rappresentato con P nella figura schematica 14, essi si propa-

gano in linea retta nella direzione PC; ma se si fa agire un campo magnetico perpendicolare al piano della figura, i raggi α si separano dagli altri, incurvandosi secondo l'arco di cerchio PA.

Vi sono ragioni per supporre, che le particelle costituenti i raggi α siano prive di carica elettrica, nell'istante in cui sono lanciate dai corpi radioattivi, ma si elettrizzino bentosto positivamente, in seguito al separarsi da ciascuna di esse di un elettrone negativo, allorchè urtano una molecola gassosa o di qualsiasi altro corpo. Recenti esperienze del sig. Thomson (55) e altre del sig. Rutherford (56) tendono a respingere questo dubbio, ed a supporre invece che, se le particelle α appaiono in certe condizioni non elettrizzate, ciò si debba al fatto, che insieme ad esse il corpo radioattivo emette elettroni negativi dotati di piccola velocità, i quali determinano, colla loro eventuale unione alle particelle α, la scarica di queste. Invece il sig. Soddy (57), in seguito ad accuratissime esperienze da poco pubblicate, è condotto ad ammettere la prima supposizione, e cioè a ritenere, che le particelle α

acquistino la carica positiva dopo avere abbandonato il corpo che le produce, verosimilmente perdendo un elettrone negativo allorchè urtano le molecole del gas.

Misurata la velocità ed il rapporto fra la carica e la massa delle particelle costituenti i raggi α, si trovò, che la velocità può arrivare a circa un decimo di quella della luce, e che il suddetto rapporto indica avere quelle particelle una massa di grandezza atomica. Si può dunque dire che i raggi α sono raggi-canali dotati di grande velocità.

È ai raggi α che è specialmente dovuta la ionizzazione dei gas, evidentemente per effetto dei loro urti. Il fenomeno resta assai circoscritto, se il gas che circonda il corpo radioattivo è alla pressione ordinaria. Infatti i raggi α del radio sono poco penetranti, bastando uno spessore d'aria ordinaria di qualche centimetro oppure una lamina d'alluminio di meno d'un decimo di millimetro di spessore, per assorbirne la massima parte.

I raggi β (che sono i primi di cui si constatò la deviazione magnetica) si comportano in tutto, come già fu detto, alla guisa dei raggi catodici, ed agiscono più fortemente degli α sui preparati fotografici e sulla maggior parte dei corpi fosforescenti. Essi devono considerarsi costituiti da elettroni negativi lanciati in ogni direzione, e con velocità enorme, giacchè può arrivare ad essere di poco inferiore a quella della luce.

In grazia forse di questa grande velocità essi possono mostrarsi assai più penetranti, non solo dei raggi α, ma anche degli ordinari raggi catodici, tanto che coll'interposizione di uno strato d'aria o di laminette solide, si riesce ad arrestare i raggi α, pur producendo soltanto un lieve indebolimento negli effetti prodotti dai raggi β.

Che i raggi β siano costituiti dal moto di cariche negative, risulta particolarmente dall'azione su di essi prodotta da un campo magnetico, azione che venne constatata quasi nello stesso tempo dai sig. Becquerel (58), Giesel (59), Meyer e v. Schweider (60) e Dorn (61). Invece di incurvarsi come i raggi α, essi si piegano assai

più e in senso opposto, come mostra la fig. 14. La curvatura di alcuni raggi β può essere così forte, che essi arrivino a colpire in $B_1 B_2$ una lastra fotografica LL, sulla quale sia stato collocato il recipiente di piombo P.

Il prodursi di raggi più o meno incurvati per azione del campo magnetico proviene da ciò, che le velocità degli elettroni negativi, di cui i raggi β non sono altro che le traiettorie, hanno valori svariati. Mentre i meno veloci sono quelli ai quali il campo magnetico fa percorrere i semicerchi di minor raggio, quelli dotati di grandi velocità percorrono archi di raggio grande. Si spiega così come si ottenga sopra una lastra fotografica una imagine allungata. Per mezzo di questa è poi facile verificare, che i raggi meno deviati, e costituiti da elettroni animati da velocità grandissime, sono anche i più penetranti. Infatti, una lastra posta sul cammino dei raggi β assorbe più degli altri i raggi più deviati prossimi a B_1. Del resto la varietà di raggi β è assai grande; e mentre alcuni sono arrestati già da una laminetta d' alluminio grossa un centesimo

di millimetro, altri possono attraversare parecchi millimetri di piombo.

Che realmente i raggi β trasportino cariche negative, fu direttamente dimostrato dai coniugi Curie (62). Nella esperienza di questi fisici, i raggi α erano arrestati da una laminetta di alluminio, e così solo l' effetto dei β era rivelato dall' elettrometro comunicante colla lamina metallica, che da essi veniva colpita, e che si caricava di più in più negativamente.

Mentre i raggi α e β sono deviati in un campo elettrico o magnetico, i raggi γ non lo sono affatto. Perciò quelli emessi dal corpo radioattivo contenuto in P (fig. 14) conservano il loro andamento rettilineo PC, anche se su di essi agisce il campo magnetico.

Come i raggi β anche i γ non sono omogenei, essendovene dei più e dei meno penetranti; tuttavia la penetrazione dei raggi γ è in complesso di gran lunga maggiore di quella dei raggi β. Queste proprietà li fanno somigliare grandemente ai raggi di Röntgen, e come tali

sono oggi generalmente considerati. Fu bensì riconosciuto, che la conducibilità eccitata nei varî gas dai raggi γ non è proporzionale a quella prodotta dai raggi X, ciò che sembrava stabilire una differenza di natura fra le due specie di raggi. Ma recenti esperienze hanno dimostrato, che quella diversità di comportamento dipende solo dall'essere in complesso i raggi γ comparabili soltanto ai più penetranti dei raggi X. Infatti, i rapporti fra le conducibilità prodotte nei varî gas dai raggi γ e dai raggi X tendono all'unità, allorchè il confronto si stabilisce fra i raggi γ e i raggi di Röntgen dati da tubi *duri* e fatti passare attraverso una lamina di piombo prima di arrivare al gas che debbono ionizzare.

Il fatto che non esistono raggi γ quando non esistono raggi β, appoggia l'opinione generalmente adottata sulla natura di quelli. Infatti i raggi γ saranno generati dall'urto dei raggi β sui diversi corpi o sulle molecole del gas ambiente, nello stesso modo che i raggi X sono

prodotti dall'urto su un corpo qualunque dei raggi catodici.

Quando le tre specie di raggi attraversano i varî corpi, essi vengono assorbiti presso a poco in ragione della densità di questi. Inoltre, a seconda della natura dei corpi stessi si producono diversi effetti, che risultano particolarmente evidenti quando si adoperi un sale di radio; anzi alcuni di questi effetti si sono finora osservati solo con questa sostanza. Come si vedrà nel Cap. seguente, vi sono sostanze radioattive che emettono soltanto raggi α, altre raggi β e raggi γ, ed altre infine che emettono le tre specie di raggi simultaneamente. In questo ultimo caso non è sempre possibile isolare completamente i raggi d'una specie dagli altri, e studiare separatamente i fenomeni da essi provocati; ma colla interposizione di lastre assorbenti si riesce a trattenere i raggi meno penetranti, cioè i raggi α, oppure questi insieme a parte dei raggi β, lasciando passare in tal caso i raggi β più penetranti insieme ai raggi γ, oppure questi ultimi da soli; e ciò basta generalmente per potere

riconoscere quali effetti producano gli uni o gli altri.

Oltre ai raggi α, β, γ, di cui si è fin qui parlato, i corpi radioattivi, a quanto pare, possono emettere continuamente degli elettroni negativi dotati di velocità relativamente piccola, e quindi pochissimo penetranti e molto deviati dalle forze elettriche e magnetiche. In causa di tali qualità, questa specie di lenti raggi β può passare inosservata. La loro esistenza venne invocata dai signori Thomson e Rutherford in seguito alle loro esperienze, istituite allo scopo di mettere direttamente in evidenza la carica positiva trasportata dai raggi α.

In ogni caso è assai verosimile, che questi raggi β dotati di velocità relativamente piccola siano in realtà raggi *secondari*, cioè che la loro emissione sia dovuta all' urto dei raggi α sulle parti più superficiali dello stesso corpo radioattivo, o sugli altri corpi incontrati nel loro cammino.

Per questo motivo, ed anche per l' esiguità degli effetti che questi raggi lenti, dato che esi-

stano, sarebbero in grado di produrre nelle circostanze comuni, sarà lecito non tenerne conto.

Gli effetti prodotti dai corpi radioattivi e particolarmente dal radio possono classificarsi in effetti luminosi, chimici, elettrici, meccanici, calorifici, fisiologici. Ecco quanto si può dire intorno ad essi, oltre a ciò che è stato esposto precedentemente.

La fosforescenza e la fluorescenza sembrano risultare soprattutto dall'azione dei raggi α e β; ma certi corpi divengono più vivamente luminosi quando sono colpiti dagli α, la maggior parte quando lo sono dai β. Per esempio, la blenda esagonale s'illumina particolarmente bene sotto l'azione dei raggi α del radio.

Il Crookes ha costruito un piccolo strumento chiamato *spintariscopio* (63), col quale si osserva appunto l'effetto prodotto dal radio sopra uno schermo ricoperto di solfuro di zinco fosforescente. Una particella di un sale di radio è fissata a mezzo millimetro circa di distanza dallo schermo, e si osserva quest'ultimo con una lente

o un microscopio. Si veggono così dei punti brillanti, che compaiono or qua or là spegnendosi immediatamente, e che danno così un effetto di scintillazione. Ogni punto luminoso sarebbe generato, secondo il Crookes, dall'urto di un ione positivo, opinione questa che oggi non può più sostenersi, il numero delle particelle lanciate contro lo schermo essendo certamente molto maggiore del numero delle scintillazioni. Secondo il Becquerel quella scintillazione sarebbe dovuta a rotture o sfaldature dei cristallini formanti lo strato fosforescente, giacchè egli ottenne effetti simili schiacciando il corpo fra due lastre di vetro (64). In ogni caso dunque il singolare fenomeno luminoso dello spintariscopio sarebbe solo indirettamente dovuto al bombardamento prodotto dai raggi α sul corpo fosforescente. Le scintillazioni possono prodursi anche con altre sostanze radioattive, e non solo sul solfuro di zinco, ma anche su altri corpi fosforescenti come il platinocianuro di bario.

I sali di radio sono luminosi, ciò che è stato attribuito ad una fosforescenza eccitata dai raggi

da essi stessi generati. Ma potrebbe darsi che la luce fosse prodotta nell' urto dei ioni α o degli elettroni β, non già contro le molecole del corpo radioattivo, ma contro quelle del gas ambiente o dei gas che lentamente si sprigionano dai sali di radio. Intanto è stato riconosciuto dal sig. Huggins e dalla sua Signora (65), che lo spettro della luce emessa dal radio è costituito da righe coincidenti con alcune di quelle dell'azoto, ed identico, o quasi, a quello del bagliore negativo prodotto nell' aria alla pressione ordinaria. E siccome lo spettro stesso non muta di aspetto allorchè il radio è posto in una atmosfera d' idrogeno (66), così è probabile che l' azoto provenga dal sale di radio, in cui era forse occluso.

Recentemente il sig. Becquerel (67) ha poi osservato, che anche i sali di uranio sono spontaneamente luminosi. Basta guardare ad occhio riposato, per esempio durante la notte, un vasetto di vetro contenente del nitrato d' uranio per convincersene. Chi scrive ha in tale occasione osservato un vivissimo scintillamento agitando il vaso contenente quel sale; ragione per cui con-

viene non agitarlo troppo, se si vuole constatare la spontanea emissione di luce e non confonderla con quella, probabilmente di origine elettrica, che si produce collo scuotimento.

Le sostanze fosforescenti si alterano sotto l'azione dei raggi emessi dal radio, e spesso cambiano colore; lo stesso vetro diviene violetto o nerastro; così modificato esso è *termolumine-scente*, giacchè diviene luminoso scaldandolo sin verso i 500°.

Queste modificazioni sono probabilmente d'ordine chimico, come quelle cui si devono le imagini su lastre fotografiche.

Stante il diverso grado di assorbimento, che i corpi di differenti densità esercitano sui raggi del radio, è possibile ottenere con essi delle *radiografie* simili a quelle, oggi tanto note, che si ottengono coi raggi X. Però queste ultime sono sempre di gran lunga più perfette.

Altre azioni chimiche prodotte dai corpi radioattivi e particolarmente dal radio sono le seguenti.

Secondo Becquerel, una soluzione di bicloruro di mercurio ed acido ossalico (6 grammi e mezzo

di bicloruro, 12 e mezzo di acido ossalico e 100 di acqua) deposita del calomelano sotto l'azione dei raggi del radio; questi agiscono dunque in tal caso come i raggi luminosi.

Sotto l'azione dei raggi del radio il fosforo ordinario si trasforma in fosforo rosso, l'ossigeno in ozono, ed il platinocianuro di bario, a cui spesso si ricorre per la sua bella fosforescenza, cambia di colore perdendo in parte questa sua proprietà, la quale però può essere ripristinata dalla luce solare. È poi cosa assai singolare, che i raggi del radio non modifichino sensibilmente il ioduro d'argento delle lastre di Daguerre.

Infine, le soluzioni di sali di radio nell'acqua danno una lenta ma continua produzione di ossigeno e di idrogeno, dovuta a decomposizione dell'acqua stessa. A quei gas trovansi mescolate delle traccie di elio, la cui provenienza probabile sarà indicata nel prossimo Capitolo.

Poichè i raggi α e β consistono nella emissione di ioni positivi e rispettivamente di elettroni negativi, è naturale che, arrestando gli uni e non

gli altri, debbano prodursi cariche elettriche. I corpi radioattivi divengono così una continua sorgente di elettricità. Anche lasciando libero corso a tutti i raggi, il corpo radioattivo si elettrizzerebbe, qualora la quantità di elettricità positiva trasportata dai raggi α non fosse eguale a quella negativa portata lontano nel medesimo tempo dai raggi β. Apposite esperienze hanno dimostrato che ciò non accade (68), e cioè che vi è compensazione fra le cariche dei due segni. Se però un involucro, per esempio di vetro non troppo sottile, arresta i raggi α, questo involucro si elettrizzerà positivamente. L'esperienza fu fatta dal sig. Wien, mediante un poco di bromuro di radio posto in un tubetto di vetro fasciato con foglia d'alluminio, e sospeso, entro un tubo vuoto, ad un filo metallico di comunicazione. La soppressione del gas intorno al tubetto è necessaria, affinchè la carica di esso non si disperda in causa della conducibilità del gas ionizzato. In certi casi si arriva ad ottenere scintille, per esempio aprendo un tubetto contenente radio (69).

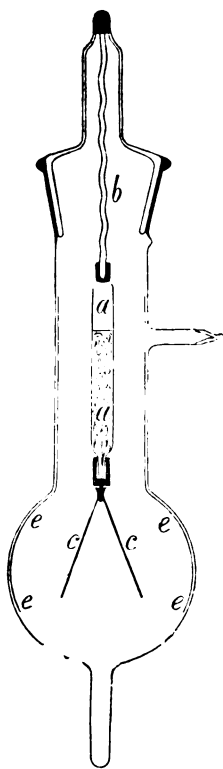
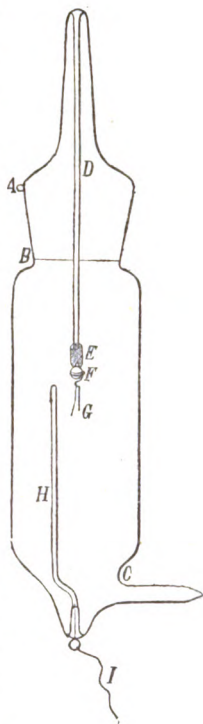
Un grazioso apparecchio (fig. 15) ideato dal sig. Strutt (70) mette in evidenza la continua produzione di elettricità per opera del radio.

Entro un recipiente di vetro ermeticamente chiuso, ed in cui fu fatto un buon vuoto, trovasi un tubetto chiuso *a* contenente un corpo radioattivo. Questo tubetto è sostenuto da un isolatore di quarzo fuso *b*, ha la sua superficie coperta d' uno strato conduttore (p. es. spalmata con acido fosforico), e regge due foglie d' oro *cc* formanti un elettroscopio.

Fig. 15.

Queste foglie veggonsi continuamente in lento moto. Esse poco a poco si aprono sinchè toccano le striscie di stagnola *ee* applicate alle pareti e comunicanti col suolo. Allora ricadono istantaneamente a contatto, per allontanarsi di nuovo lentamente, e così di seguito. Questo effetto è

dovuto alla carica positiva che i raggi α assorbiti lasciano al tubetto, mentre la carica negativa è trasportata lontano dai raggi β. L'apparecchio della fig. 16 costruito da chi scrive (71) è una modificazione di quello di Strutt. La piccola quantità di brumuro di radio (5 milligrammi di sale non puro, equivalente forse a 1 milligrammo di bromuro allo stato di purezza) è contenuta in un globetto di vetro *F* rivestito di foglia d'alluminio, colla quale comunica un piccolissimo elettroscopio *G*, simile a quello della fig. 12, di cui si proietterà poi sopra un diaframma l'imagine ingrandita. La foglia d'oro compie oscillazioni col periodo di 5 o 6 secondi, mentre le foglie d'oro del tubo di Strutt hanno di solito un periodo assai più lungo.

Fig. 16.

Un altro effetto d'ordine elettrico dovuto ai raggi del radio si ottiene, secondo il sig. Curie (72),

nel modo seguente. Si dispongano dei conduttori in maniera tale, che le scariche d'una macchina elettrica o di un rocchetto possano seguire due diverse vie, in ciascuna delle quali si abbia una interruzione per la formazione delle scintille. Se queste due interruzioni sono equivalenti, nel senso che la scarica segua indifferentemente l' una o l' altra delle due vie che gli sono offerte, basta avvicinare il radio ad una delle due interruzioni, perchè in quella e non più nell' altra si formi la scintilla di scarica. I raggi del radio producono dunque un' azione simile a quella, che in certe circostanze è data dai raggi di Röntgen, tendente a favorire la produzione delle scintille. Vi sono però dei casi in cui i raggi del radio tendono ad impedire, anzichè a favorire, la produzione della scarica (73), ciò che del resto si verifica anche per opera dei raggi di Röntgen o dei raggi luminosi.

I raggi dei corpi radioattivi, attraversando liquidi o solidi poco conduttori, ne aumentano la conducibilità elettrica. Questo fatto fu annunciato poco dopo la scoperta del radio (74); ma

solo più tardi chi scrive lo dimostrò in modo da non lasciar dubbio sulla sua realtà, almeno nel caso dei liquidi (75), mentre il sig. Becker (76) quasi contemporaneamente lo dimostrava nel caso dei dielettrici solidi. È verosimile, che la maggior conducibilità assunta dai cattivi conduttori si produca in modo simile che nei gas, cioè sia la conseguenza della produzione di nuovi ioni in seguito agli urti delle particelle costituenti i raggi α e β.

Un ultimo effetto elettrico del radio è stato, or non è molto, annunciato, e cioè una diminuzione di resistenza elettrica del bismuto, allorchè presso questo metallo, in forma di lamina sottile, ed a piccolissima distanza dal medesimo è collocato il corpo radioattivo.

Poichè i raggi α consistono in ioni positivi, l'emissione di essi è necessariamente emissione di materia; e, come si vedrà, si può sotto un certo punto di vista dire altrettanto pei raggi β.

È da prevedersi dunque una continua diminuzione di peso dei corpi radioattivi. Il sig. Heydweiller (77) credè di riscontrarla; ma il sig. Dorn

(78) non potè averne conferma, pur impiegando un corpo di maggiore radioattività. Si tratta dunque di una diminuzione di massa così piccola da sfuggire ad ogni diretta constatazione.

L'emissione delle varie specie di raggi è accompagnata nel radio da una continua produzione di calore. I signori Curie e Laborde (79) riconobbero infatti, che una piccola quantità di sale di radio conservava costantemente una temperatura più elevata della temperatura ambiente.

L'esperienza assai semplice è così descritta dalla signora Curie. Un'ampolletta di vetro chiusa contenente 7 decigrammi di bromuro di radio puro è messa entro un vaso di vetro a doppia parete chiuso con cotone, insieme ad un termometro a mercurio. Fra le due pareti del vaso è fatto il vuoto, ed anzi quel vaso è uno di quelli che si adoperano per la conservazione dell'aria liquida, appunto in grazia del buon isolamento calorifico che in tal modo si ottiene. Un ugual termometro insieme ad una eguale ampolletta di vetro, la quale però contiene invece del corpo radioattivo un corpo inattivo come sarebbe il

cloruro di bario, sono collocati entro un secondo vaso di vetro simile al precedente. Una volta stabilito l'equilibrio di temperatura si osserva, che il primo termometro segna una temperatura di circa 3.° superiore a quella del secondo

Per misurare la quantità di calore continuamente svolto dal sale di radio, ne fu introdotta una piccola quantità in un calorimetro di Bunsen. Dalla quantità di ghiaccio che si fondeva in un determinato tempo si dedusse, che il calore sviluppato in un'ora dal corpo radioattivo sarebbe sufficiente per fondere un peso di ghiaccio eguale a circa una volta e un quinto il suo peso, o anche per riscaldare di circa 100.° un egual peso di acqua. E così si vede, come la quantità di calore fornita dal radio sia relativamente assai grande.

Se i sali di radio non assumono, ad onta di questa costante produzione di calore, una temperatura molto elevata, ciò si deve alla lentezza di produzione, paragonata per esempio alla rapidità con cui si svolge il calore nelle combustioni, come pure al fatto, che l'esperienza non si è

potuto fare finora che su minime quantità di sostanza. Il calore che continuamente si svolge deve attraversare un piccolissimo spessore del corpo per giungere alla superficie, e comunicarsi all' aria o agli altri corpi circostanti, e le temperature divengono ben presto stazionarie, stabilendosi un compenso fra il calore svolto e quello disperso nell' ambiente. Ma qualora si avesse una rilevante quantità di radio in forma compatta, siccome esso presenterebbe una superficie minore relativamente alla sua massa, la propagazione del calore richiederebbe temperature più elevate per lo stato di regime stazionario. Anzi si può ritenere, che una grande massa radioattiva arriverebbe ad arroventarsi, ed anche raggiungerebbe temperature più elevate di quella d'arroventamento, specialmente poi se la si circondasse di corpi cattivi conduttori pel calore.

Si è pensato, che il calore proprio della terra sia, almeno in buona parte, dovuto al radio o in genere alle sostanze radioattive in essa contenute. Ammesso, come tutto porta a credere, che la radioattività della nostra atmosfera, di

cui più oltre si terrà parola, si debba a radio contenuto nel suolo, si riconosce, che il nostro globo deve contenere quantità tale di radio da influire notevolmente sulla sua temperatura, e da far ritenere, che il periodo di tempo già trascorso, da quando sul nostro globo divenne possibile la vita, sia assai più lungo di quello che approssimativamente si calcola in base alle leggi del raffreddamento.

Analogamente si è immaginato, che il calore solare sia fornito in parte a questo astro dal radio in esso contenuto. Basterebbe che ogni metro cubo della massa solare contenesse circa 3 grammi e mezzo di radio, per render conto dell' immensa quantità di calore che è irraggiata continuamente nello spazio. Pur supponendo assai minore il contenuto in radio del sole, esso deve aver esercitato ed esercitare ancora una considerevole influenza sull' evoluzione termica dell'astro.

È bensì vero, che fra le numerose righe caratteristiche dello spettro della luce solare sembrano mancare quelle che caratterizzano il radio; ma la luce emessa da questo corpo non fu studiata

in circostanze svariate, e d'altra parte si riconosce nel sole la presenza dell'elio, il quale, come si vedrà, è quasi certamente un prodotto di trasformazione del radio, e rende probabile, se non la presenza attuale del radio nel sole, almeno la sua esistenza in epoche anteriori.

L'uranio, il torio e l'attinio danno naturalmente una produzione di calore di gran lunga più piccola, e che difficilmente si riesce a misurare. Tuttavia pel torio si e trovata una produzione di calore in ragione di circa 7 decimi di caloria per ogni gramma e nel corso di un anno (80).

Un effetto termico d'altro genere è quello dimostrato dal sig. Georgiewski (81). Secondo questo autore, mentre la velocità di raffreddamento di un corpo caldo non varia, quando si ionizza coi raggi del radio il gas che lo circonda, il raffreddamento stesso si accelera se il corpo caldo è elettrizzato, e sopra tutto se lo è negativamente. Questo risultato fu osservato non solo coll'aria, ma anche con altri gas, sia che si

lasciasse) agire tutti i raggi del radio, sia che i raggi α fossero trattenuti.

I raggi del radio, e in generale dei corpi radioattivi, colpendo un corpo inattivo, gli fanno emettere nuovi raggi, detti *raggi secondari*. Questa emissione è contemporanea all' azione dei raggi incidenti. La proprietà di eccitare raggi secondari appartiene anche ad altre radiazioni, come i raggi X ed i raggi catodici, ed il più delle volte i raggi secondari diversificano da quelli eccitatori. Così si può dire, che i raggi X sono raggi secondari prodotti dai raggi catodici, i quali alla lor volta possono essere generati dai raggi X (82). Questi ultimi producono inoltre raggi secondari della loro stessa natura, ma meno penetranti. I raggi luminosi ed ultravioletti possono dare raggi catodici come raggi secondari, ecc... I raggi dei corpi radioattivi producono effetti di tal genere, che peraltro non sono stati ancora studiati in modo esauriente.

È però dimostrato (83), che i raggi β producono l' emissione di raggi secondari della stessa

natura, ossia l'emissione di elettroni negativi, dai corpi che essi colpiscono, i quali tendono perciò a caricarsi positivamente, mentre i raggi incidenti β tendono a caricarli negativamente.

Oltre agli effetti già descritti, i raggi emessi dal radio esercitano azioni pronunciatissime sui tessuti viventi, che possono arrivare fino alla produzione di profonde lesioni difficili a guarire. Il sig. Becquerel ed i signori Curie ebbero a constatarlo a loro spese (84). Secondo il sig. Danysz (85) un tubetto, contenente un corpo fortemente radioattivo e posto sulla pelle di un animale, provoca una distruzione completa dell' epidermide e del derma, mentre l' azione sui tessuti sottostanti è relativamente assai debole. Il sistema nervoso è invece assai sensibile all' azione del radio, così che in breve si producono lesioni capaci di dare la paralisi e la morte. L' effetto prodotto sui bacteri è pure notevole, giacchè, secondo i signori Aschkinass e Caspari (86), per certe specie resta sospeso il loro sviluppo. L'azione prolungata dei raggi del radio sulle larve di certi insetti le fa

morire, e toglie ai semi di certe piante la facoltà di germogliare.

Sembra poi che, a compenso delle azioni deleterie da essi esercitate, i raggi emessi dai corpi radioattivi posseggano virtù curative.

Analogamente a ciò che suol accadere dopo ogni grande scoperta nel campo della fisica, sorsero le più fantastiche speranze anche sull' uso del radio come agente terapeutico, e qualcuno anzi formulò conclusioni premature. Tuttavia pare oramai veramente dimostrata l' azione benefica, che i raggi del radio, non meno dei raggi X, esercitano nei casi di lupus o di cancro (87). Eminenti cultori delle scienze biologiche, che in Italia e fuori stanno studiando i possibili effetti curativi del radio per queste e per altre malattie, come la rabbia (88), ottennero già risultati assai promettenti, dei quali però non potrei far cenno senza allargare di troppo i confini di questo scritto, e senza sorpassare di troppo quelli della mia competenza.

A proposito delle relazioni fra corpi radioattivi e corpi viventi non posso astenermi dal-

l'accennare di volo alla pretesa scoperta d'uno studioso del laboratorio Cavendish di Cambridge, l'annuncio della quale produsse in molti profonda sensazione, in altri immediata diffidenza. Asserì il sig. Burke (89) di aver dato origine a forme viventi proiettando qualche particella di cloruro o di bromuro di radio in un brodo gelatinoso previamente sterilizzato a 130°. Dopo un giorno o due si formano effettivamente con tale procedimento delle modificazioni nella gelatina, che hanno l'aspetto di culture di bacteri, che si accrescono col tempo, e che mostrano la formazione di nuovi nuclei per scissione di quelli già esistenti. Il sig. Burke chiamò *radiobi* gli elementi vivi, che sarebbero così stranamente creati col radio. Ma la critica acuta del sig. Ramsay (90) riconduce un tale fenomeno nel campo inorganico.

È noto che quando un sale di radio viene sciolto nell'acqua, si ottiene dalla soluzione un olent svolgimento di gas, cui si mescola quella *emanazione*, di cui fra poco si terrà parola, e che prima era occlusa entro il sale. Una par-

ticella del sale di radio introdotta nella gelatina produrrà dunque una bollicina microscopica, la quale resterà imprigionata in un esile pellicola se, come si crede, l'emanazione ha il potere di coagulare l'albumina. Continuando lo sviluppo gassoso accadrà facilmente, che quella pellicola ceda alla pressione ove è meno resistente. Allora parte del gas uscirà per l'apertura così formata generando una nuova bollicina, e un tal processo evidentemente simulerà lo sdoppiamento di un nucleo. I radiobi non sarebbero dunque che bollicine microscopiche.

Secondo recenti esperienze del sig. Rudge (91) non sarebbe neppur necessario tener conto della ammessa azione coagulante dell'emanazione sull'albumina del brodo. Infatti questo fisico ha ottenuto i risultati stessi del sig. Burke adoperando, non più sali di radio, ma sali solubili di bario, di stronzio o di piombo.

Un altro argomento contro i pretesi radiobi risulta poi dal fatto che, introducendo in un mezzo nutritivo delle porzioni di quelle supposte

culture ottenute col radio, non si riescì mai ad ottenere culture nuove.

Per una curiosa coincidenza, la formazione di bolle in un liquido denso ed il loro scindersi e propagarsi fu realizzato molti anni fa in maggior scala, cioè con bolle perfettamente visibili, e di cui spesso era possibile seguire coll' occhio le successive trasformazioni. Infatti, mentre lasciando cadere in una densa soluzione di vetro solubile dei cristalli di solfato di ferro si ottiene dopo qualche tempo quella curiosa apparente vegetazione, che dicesi *albero di Marte*, lasciando cadere in quel liquido cristalli d'altre sostanze, chi scrive ottenne appunto in certi casi la formazione di bolle gassose chiuse in sottili pellicole, le quali salendo, spesso a vista d' occhio, verso la superficie del liquido, davano origine a tubi di forme diverse, e non di rado a nuove bolle in seguito al traforarsi delle pellicole suddette (92).

Per terminare l' enumerazione degli effetti dovuti alle radiazioni dei corpi radioattivi aggiungerò, che l' asserita sensibilità della retina a tali radiazioni non è un effetto fisiologico diretto, ma

si spiega colla fluorescenza delle parti costitutive dell'organo visivo. Il fenomeno si produce anche nell'occhio di un cieco, purchè la retina e il nervo ottico siano in condizioni normali.

Infine, secondo il sig. Bloch (93), i raggi del radio agirebbero come la luce sul selenio cristallino aumentandone la conducibilità elettrica.

I corpi radioattivi, od almeno il radio, il torio e l'attinio, oltre ad emettere i raggi α, β e γ, lasciano sfuggire continuamente parte della loro sostanza sotto altra forma.

Certe esperienze relative alla ionizzazione dell'aria prodotta dai composti di torio condussero il sig. Rutherford a scoprire l'*emanazione* radioattiva del torio. Già il sig. Owens (94) aveva notata una strana irregolarità nell'azione ionizzatrice dei raggi dell'ossido di torio; ma fu il Rutherford che ne diede la spiegazione (95) dimostrando, che il torio emette continuamente delle particelle radioattive, la cui azione ionizzatrice si aggiunge a quella dovuta ai raggi α, β o γ. Il radio produce esso pure la sua *emanazione*, come fu riconosciuto dal sig. Dorn (96), e così

pure l' attinio (97), e le particelle costituenti queste emanazioni si distinguono da quelle costituenti i raggi α e β in ciò, che le prime si diffondono lentamente a guisa delle molecole di un gas, anzichè essere lanciate come le seconde con enorme velocità.

Infatti l'emanazione si mescola al gas ambiente e può essere insieme a questo trasportata da un luogo all'altro. E che si comporti come un vero gas è confermato dalle esperienze del sig. Traubenberg (98), secondo le quali tanto l'emanazione contenuta nelle acque potabili di Friburgo (e in generale le acque di sorgenti contengono tutte qualche sostanza radioattiva), come pure l'emanazione del radio, obbediscono alle stesse leggi di Dalton e di Henry, che valgono per i gas.

Mentre le emanazioni si comportano fisicamente come un gas, il loro comportamento chimico mostra in esse una assenza completa di affinità, ciò che la fa somigliare ai gas della famiglia dell'argon. Esse infatti rimangono inalterate, quando si fa gorgogliare il gas che le contiene attraverso ogni più energico reagente liquido, o quando si

fanno passare sopra le più diverse sostanze, sia fredde sia ad alta temperatura, capaci di far entrare in combinazioni chimiche i principali gas conosciuti.

Dalla rapidità, sperimentalmente misurata, con cui l' emanazione si diffonde da luogo a luogo nel seno d' un gas, si è poi potuto approssimativamente valutarne il peso molecolare, e si è trovato che esso deve poco differire dal valore 100.

Un carattere essenziale delle emanazioni consiste in ciò, che esse sono solo temporaneamente radioattive, e cioè che la loro radioattività scema in modo continuo, tanto che in capo a circa un minuto primo l' emanazione del torio ha la propria attività ridotta a metà del valore iniziale, mentre quella del radio perde la sua attività assai più lentamente, riducendosi a metà solo in capo a quasi quattro giorni.

L' emanazione dell' attinio perde invece la sua radioattività assai rapidamente, giacchè essa si riduce a metà in circa 4 secondi. In conseguenza di ciò l' emanazione dell' attinio non si manifesta che a pochi centimetri di distanza dal corpo

attivo, decrescendo in breve la sua proprietà radioattività sino a zero (o, come si vedrà nel Capitolo seguente, distruggendosi in breve l'emanazione) mentre si diffonde nell'aria circostante.

I sig. Rutherford e Soddy (99) hanno poi dimostrato, che l'emanazione del radio si condensa ad una temperatura di circa 150° sotto lo zero ordinario. Se infatti una corrente di gas, dopo essere passata sopra un composto di radio, arriva in un tubo circondato da aria liquida, il gas esce dal tubo interamente spogliato dalla emanazione, la quale poi ritorna gassosa, se si lascia elevare la temperatura sino al valore suindicato. È facile seguire le vicende della emanazione, perchè essa è luminosa, e rende luminoso il vetro del tubo che la contiene. L'emanazione del torio si condensa ad una temperatura un poco meno bassa, e cioè a circa 120° sotto zero.

Recentemente il Rutherford ha constatato (100), che l'emanazione del radio è in gran copia assorbita dal carbone, e particolarmente da quello ricavato dalla noce di cocco. L'aggiunta d'un corpo fosforescente al carbone mostra colla sua

crescente luminosità il graduale assorbimento. Questa nuova proprietà della emanazione potrà avere utili applicazioni, per esempio ad impedire il diffondersi di essa negli ambienti, quando si abbiano delle soluzioni di radio, le quali non si possono conservare in vasi chiusi in causa dei gas che da esse continuamente si svolgono.

L'emanazione ha la proprietà di rendere temporaneamente attivi i corpi, coi quali giunge in contatto. Questa radioattività acquistata in tal modo da corpi, che per sè stessi non la possiederebbero, fu quasi simultaneamente scoperta, nel caso del radio dai coniugi Curie (101), che la denominarono radioattività *indotta*, e dal sig. Rutherford (102) nel caso del torio. Risulta da molte ricerche, e specialmente da quelle di questo autore, che la radioattività indotta è dovuta ad una sostanza solida invisibile depositata dalla emanazione sui corpi in quantità inapprezzabile, a cui diede dapprima il nome (ora abbandonato) di *emanazione-X*. Essa può essere sciolta da certi acidi e non da altri. Facendo evaporare la soluzione così ottenuta, si ricava un residuo

radioattivo. Sembra inoltre che l'emanazione aderisca come tale ed anche imbeva in certo modo i corpi da essa resi attivi, giacchè questi corpi emettono essi stessi dell'emanazione. Il celluloide, la gomma elastica, la paraffina assorbono e poi restituiscono l'emanazione in notevoli quantità. Indipendentemente da ciò si è riconosciuto che, riscaldando un corpo reso radioattivo dalla emanazione del radio, esso perde in gran parte la propria attività, la quale è acquistata invece dai corpi freddi circostanti.

La carica negativa di un corpo circondato dall'aria alla pressione ordinaria facilita la produzione della radioattività indotta, giacchè in tal caso la sostanza attiva viene depositata dall'emanazione soltanto sul corpo elettrizzato negativamente. Se l'aria è assai rarefatta, la detta carica elettrica non ha più effetto.

Sembra che una emanazione radioattiva esista continuamente nella nostra atmosfera, giacchè basta tenere, come fecero i sig. Elster e Geitel (103), un conduttore fortemente carico negativamente, o anche in certi casi positivamente

secondo il prof. Sella (104), nell'aria libera per qualche ora, onde renderlo radioattivo.

Si può produrre la radioattività di sostanze per sè stesse inattive anche operando in un'altra maniera, e cioè sciogliendo il corpo inattivo in un liquido insieme ad un corpo attivo, e poi separandolo con mezzi chimici. Si ottiene cosí del bismuto attivo, dopo averlo sciolto in una soluzione contenente radio. In generale il corpo reso radioattivo in questa maniera perde a poco a poco la sua attività. Similmente è radioattivo un sale di bario, se si ricava da una soluzione d'uranio, ed intanto quest'ultimo perde parte della sua radioattività, che poi esso riacquista lentamente.

Di questi e simili fenomeni dovremo a lungo occuparci in seguito. Per ora interessava soltanto notare, che a torto vennero confusi con quelli della radioattività indotta, mentre sono invece dovuti allo scindersi della sostanza radioattiva in due porzioni dotate di proprietà differenti.

Altri fenomeni analoghi al precedente, e che saranno richiamati più oltre, sono quelli descritti

dal sig. Crookes e dai sig. Rutherford e Soddy; consistono nella separazione chimica dell' uranio o del torio in due porzioni, una delle quali assai attiva, che col tempo perde a poco a poco la sua radioattività, mentre l' altra col tempo riacquista la proprietà perduta.

La continua generazione di calore, come pure l' emissione dei raggi α, non spettano interamente al radio, ma per tre quarti circa alla emanazione che da esso si svolge (e ai depositi che sono causa della radioattività ridotta). Se con opportuno riscaldamento di un sale di radio lo si libera per quanto si può della emanazione che può esservi occlusa, e questa si raccoglie a parte in un tubo raffreddato con aria liquida, quando il tubo col radio ed il tubo coll' emanazione si sono messi in equilibrio di temperatura coll'ambiente si riconosce, che la quantità di calore prodotta nella unità di tempo dal radio, dopo aver diminuito sino ad un minimo durante alcune ore, va aumentando gradatamente, mentre quella svolta dall'emanazione, dopo aver aumentato sino ad un massimo va diminuendo, in modo che la

somma delle due conservi un valore sensibilmente costante (105). Se poi per mezzo della ionizzazione di un gas si misura l'emissione di raggi α per parte del radio e per parte dell'emanazione, si riconosce un andamento in tutto simile a quello dell'emissione di calore. Ciò induce a supporre (106), che il calore svolto dal radio sia dovuto agli urti dei ioni positivi (raggi α) contro le molecole d'aria o contro quelle della stessa sostanza radioattiva. La velocità trovata pei raggi α, che può arrivare ad $^1/_{10}$ di quella della luce, è tale da soddisfare a tale ipotesi.

È probabile, che la radioattività sia una proprietà posseduta in grado diverso da tutti i corpi. Infatti risulta da recenti esperienze, che un elettroscopio elettrizzato, per esempio quello della fig. 11, si scarica con differente rapidità a seconda della natura delle pareti del recipiente in cui è racchiuso (107), ciò che si attribuisce alla radioattività delle pareti stesse. È inoltre provato, che radiazioni penetrantissime esistono continuamente intorno a noi, producendo una lieve ionizzazione dei gas, giacchè la rapidità di scarica suddetta

si rende minore circondando l'apparecchio con un grosso involucro di piombo (108). Verosimilmente tali radiazioni altro non sono che i raggi γ provenienti dal materiale radioattivo contenuto nel globo (109). Si potrebbe poi sospettare, che la lieve radioattività dei corpi usuali fosse, in parte almeno, una emissione di raggi secondari eccitata nei corpi stessi dalle suddette radiazioni.

Ha una speciale importanza il fatto, che l' aria abbia una conduttività elettrica superiore a quella ordinaria, se viene tratta per aspirazione dal terreno. Siccome oltre a ciò si è riconosciuto, che molte acque di pozzo o di sorgente, per esempio l' acqua potabile di Cambridge (110), contengono un gas radioattivo, che si mescola all' aria che in esse si faccia gorgogliare, rendendola alquanto conduttrice, così si è indotti a supporre coi signori Elster e Geitel (111), che nel terreno vegetale sia diffusa una sostanza radioattiva, probabilmente radio, la cui emanazione è trasportata dall' aria racchiusa nel terreno stesso, e che in piccola parte si scioglie

nelle acque delle sorgenti. Quasi tutte le sorgenti d'acqua, e particolarmente quelle termali, di cui è ricco il nostro paese, come pure le sorgenti naturali di anidride carbonica o di altri gas finora esaminate e quelle di petrolio contengono sostanze radioattive.

Il sig. Allen (112), che ha riconosciuto la radioattività della sorgente King 's Bath, mette avanti un'idea degna di essere presa in considerazione, e cioè che forse l'azione terapeutica delle acque minerali in genere potrebbe essere in parte almeno dovuta ad una emanazione o ad un gas radioattivo in esse contenuto, con che si renderebbe conto facilmente del fatto, spesso asserito se non ineccepibilmente dimostrato, che le acque col trasporto divengono meno efficaci. Secondo recentissime esperienze del sig. Loewenthal (113) l'efficacia dei bagni termali nelle affezioni reumatiche e simili è appunto dovuta all'emanazione radioattiva contenuta nelle acque, la quale penetra nell'organismo specialmente per le vie respiratorie.

Anche i fanghi depositati da molte acque termali sono radioattivi (114). Le acque di S. Giu-

liano (115) presso Pisa contengono in molta copia una emanazione radioattiva, la quale, a differenza di ciò che avviene per tutte le altre sorgenti termali, sembra non essere identica all'emanazione del radio. A parte questo caso speciale, è naturale il supporre, che la proporzione di sostanze molto radioattive e particolarmente di radio contenuta nella crosta terrestre aumenti insieme colla profondità (116). Perciò l'istituire ricerche intorno ai prodotti vulcanici è cosa molto opportuna.

La neve di recente caduta è radioattiva; chi scrive ha avuto occasione di constatare, che in una giornata di neve la conduttività dell'aria era più che doppia del consueto.

Questi fatti dimostrano come le sostanze radioattive siano in piccola proporzione largamente diffuse nel nostro globo, e come sia possibile attribuire a traccie minime di uranio, di torio, di attinio o più probabilmente di radio, la piccola radioattività che mostra possedere la maggior parte dei corpi conosciuti.

Ne risulta che la radioattività, anzichè essere una proprietà generale posseduta in diverso grado da ogni specie di materia, potrebbe invece spettare soltanto a poche sostanze. Però la prima alternativa appare più probabile della seconda, quando si ponga mente a ciò che verrà esposto nel seguente Capitolo.

Capitolo VI.

Le trasformazioni atomiche dei corpi radioattivi.

Ai fatti esposti nel precedente Capitolo altri, in gran parte più recenti, dovremo aggiungere in questo, i quali nel loro insieme permettono di scrutare più addentro l'intimo probabile meccanismo dei fenomeni radioattivi.

Che questi fenomeni abbiano negli atomi la loro sede, risultò dalle prime esperienze della signora Curie, secondo le quali la proprietà caratteristica d'un elemento radioattivo rimane invariata quando entra a far parte, con atomi di differente natura, di qualche combinazione chimica. D'altra parte è di piena evidenza che un corpo radioattivo perde continuamente, sotto forma di ioni costituenti i raggi α, parte della propria sostanza. Ne risulta come sommamente

probabile, che la radioattività sia dovuta alla scissione degli atomi radioattivi.

Per chi accetta le nuove idee, che ora tendono a prevalere e secondo le quali elettricità e materia non sono enti distinti, l'indivisibilità dell'atomo, proclamata dalla sua stessa denominazione, risulta già smentita dalla teoria dell'elettrolisi, in quanto che questa teoria richiede la possibilità della separazione dall'atomo, o dell'aggiunta al medesimo di una determinata carica elettrica; ma l'emissione delle particelle α, le quali hanno massa di grandezza atomica, dimostra che, almeno per i corpi radioattivi, difficilmente si può ammettere ancora l'integrità degli atomi, anche da chi si attenga all'antico concetto sulla materia ponderabile.

Può sembrare a prima giunta, specialmente a chi non voglia rinunciare di buon grado al dogma della indivisibilità degli atomi, che per la sua antichità e per la forza dell'abitudine ha messo nella mente di molti profonde radici, che i fenomeni radioattivi possano considerarsi come fenomeni chimici, e che un corpo radioattivo sia

semplicemente un composto, la cui molecola si scinde negli atomi di cui è costituita. Si potrebbe per esempio paragonare il radio all'ammonio ($N H_4$), e le particelle α ai ioni d'idrogeno; Allora, nello stesso modo con cui l'ammonio, quando venga privato dei suoi atomi d'idrogeno uno per volta, si trasforma successivamente in ammoniaca ($N H_3$), poi in diammide $(N H_2)_2$, e poi, dopo altre sottrazioni d'idrogeno, in acido azotidrico ($N_3 H$) e infine in azoto, così il radio con ripetute emissioni di particelle α si trasformerebbe prima in emanazione, e poi nei successivi prodotti, che più avanti impareremo a conoscere dettagliatamente.

Ma un'analogia come questa è affatto superficiale. Infatti l'emissione di idrogeno dall'ammonio, allorchè scomponendosi si trasforma in ammoniaca, non si compie colle modalità caratteristiche della radioattività, non si ha cioè una proiezione di ioni d'idrogeno animati da velocità grandissima, nè la produzione d'una ingente quantità di calore. Inoltre, mentre un corpo radioattivo possiede sempre le stesse proprietà radioat-

tive qualunque sia il composto di cui fa parte, evidentemente non può dirsi altrettanto dell'ammonio. Sembra bensì risultare da esperienze del sig. Coehn (117), che dall'ammonio recentemente ottenuto in forma di amalgama per via elettrolitica lentamente si separi idrogeno con carica positiva, il quale lascia una carica negativa all'amalgama; ma durante questo fenomeno chimico non si manifesta veruna azione sui preparati fotografici, come è stato or ora dimostrato dai signori Baborovsky e Vojtěch (118), e quindi non si ha indizio dell'esistenza di raggi analoghi ai raggi α, i quali non sono privi di azione fotografica. In via generale si può poi osservare, che non si ha esempio di reazioni chimiche che si producano in modo sensibilmente uniforme e quasi indefinitamente, senza essere menomamente turbate da qualsiasi influenza esterna, come p. es. la temperatura, la quale, è noto, non esercita sulla radioattività di una data sostanza, azione sensibile; come non si ha esempio di decomposizioni chimiche le quali svolgano, relativamente alla quantità di materia che si scompone, quantità di calore paragonabili

a quella relativamente enorme che si produce nei corpi radioattivi o almeno nel radio. Perciò, salvo che non si volesse dare una straordinaria estensione al significato comune dei vocaboli, non si può assolutamente considerare la radioattività come una decomposizione chimica spontanea di certi corpi, i quali più non meriterebbero la denominazione di elementi.

L'ipotesi, che sarà esposta nell' ultimo Capitolo, secondo la quale gli atomi di tutti i corpi sono costituiti da elettroni delle due specie, sembra ideata espressamente per spiegare la radioattività. Basta infatti supporre, che un sistema di elettroni formante atomo non sia sempre dotato di stabilità assoluta. Gli atomi dei corpi radioattivi sarebbero appunto atomi instabili; qualcuno di essi ad ogni istante si sfascierebbe dando luogo a sistemi meno complessi, che alla lor volta possono essere stabili o no. Gli atomi costituiti dal maggior numero di elettroni, e cioè quelli dei corpi che hanno i pesi atomici più grandi, sarebbero appunto i meno stabili.

Come si è costretti ad immaginare, che le molecole nei corpi e gli atomi nelle molecole siano animati da rapidi movimenti, così si deve supporre che gli elettroni nell'atomo siano in moto. Già dai fatti esposti nel Capitolo II apparve la necessità di ammettere, che gli elettroni negativi siano animati da moti di rivoluzione rapidissimi, a guisa forse di pianeti d'un sistema solare. Si comprende quindi come, nell'atto in cui un atomo si disaggrega, qualcuno almeno di quegli elettroni negativi sfugga libero in linea retta colla velocità da cui si trovava animato, e generi così i raggi β; e come altri elettroni negativi, trascinandone dei positivi, con cui formano gruppi complessi forse preesistenti, vengano lanciati in ogni direzione dando origine così ai raggi α.

Il calore svolto continuamente nei corpi radioattivi sarebbe quindi l'equivalente dell'energia di moto delle particelle emesse, e specialmente delle α, e quindi una trasformazione dell'energia preesistente nell'atomo. Quest'energia interna degli atomi dovrà ritenersi di gran lunga maggiore di quella spettante agli atomi considerati

come parti indivisibili costituenti le molecole dei corpi, giacchè le quantità di calore svolte dai corpi radioattivi sono di gran lunga maggiori di quelle messe in giuoco nelle reazioni chimiche.

Non è quella, sommariamente esposta nelle linee precedenti, la sola ipotesi che si sia proposta per rendere conto della radioattività, e particolarmente dell' energia continuamente fornita dai corpi radioattivi. I coniugi Curie (119) supposero invece, che il calore svolto dai corpi radioattivi provenga in qualche modo dal mezzo ambiente; il Sig. Sagnac (120) precisando questo concetto ha supposto, che l' energia necessaria alla manifestazione dei fenomeni radioattivi provenga dalle particelle mobili con grandi velocità nello spazio in ogni direzione, immaginate dal Lesage per rendere conto della attrazione universale, ed ha tentato delle esperienze in appoggio di questo concetto, le quali però non hanno dato risultati sicuri; il sig. J. J. Thomson (121) imaginò una contrazione degli atomi per render conto del calore svolto, riportando così al caso di quegli atomi la spiegazione che si dà per la conserva-

zione del calore solare; altri infine ammisero la esistenza di una radiazione sconosciuta, la cui energia venisse accumulata dagli atomi dei corpi radioattivi. A proposito di questa ipotesi si può osservare però, che se una tale radiazione fosse realmente la causa della radioattività, dovendo essa verosimilmente essere assorbita dai corpi radioattivi, un involucro da questi formato dovrebbe rendere minore la radioattività di un corpo in esso contenuto. Non si e mai pensato forse ad un'esperienza di questo genere ed in questi precisi termini; ma i signori Elster e Geitel (122) hanno riconosciuto, che la radioattività di un dato corpo non scema, se lo si porta sotterra, per esempio in una miniera, in modo che uno strato di ben ottocento metri di crosta terrestre ad esso sovraincomba; ed è poco verosimile che quello strato non debba assorbire in modo sensibile le supposte radiazioni attraversanti lo spazio.

Però l'ipotesi formulata per prima circa l'origine dell'energia continuamente generata dai corpi radioattivi sembra debba preferirsi, perchè direttamente risulta dal concetto della disaggregazione

atomica, la quale, enunciata dai signori Rutherford e Soddy (123), ha servito di guida a questi e ad altri fisici nelle loro posteriori ricerche. Essa presenta una semplicità e una verosimiglianza maggiori, e l'adotteremo anche perchè ci permetterà di esporre in questo Capitolo, con maggior ordine, chiarezza e concisione, i numerosi fatti che si sono raccolti.

Per dare una esatta idea dei metodi di ricerca che, in un tempo relativamente breve, hanno fornito le molte cognizioni precise intorno ai fenomeni radioattivi che già si posseggono, comincierò dallo studiare qualche caso assai semplice, ed in primo luogo le modificazioni delle proprietà radioattive, che, per mezzo di certi trattamenti chimici, si possono provocare nell'uranio.

Aggiungendo a una soluzione d'uranio una soluzione di carbonato d'ammonio, il sig. Crookes (124) ottenne un precipitato, che, continuando ad aggiungere carbonato, poteva quasi interamente sciogliersi di nuovo, in modo da non lasciare che un piccolo residuo. Questo si mostrò assai più energicamente radioattivo dell' uranio, in

quanto all' azione fotografica, mentre l' uranio rimasto nella soluzione, e da questa ricavato ed esaminato collo stesso metodo, appariva privo d'azione. All'incognita sostanza di grande radio-attività, contenuta nel precipitato, il Crookes diede il nome di uranio-X (Ur-X). Questo corpo mostrò, come le emanazioni, il carattere essenziale di perdere col tempo la sua radioattività. Esaminato poi l' uranio reso inattivo nella soluzione riconobbe, che esso gradatamente riacquistava la radioattività perduta.

Una simile separazione fu ottenuta dal signor Becquerel (125) aggiungendo alla soluzione di uranio del cloruro di bario, e precipitando quest' ultimo come solfato. Infatti il solfato di bario così ottenuto mostrava di contenere Ur-X, essendo radioattivo e perdendo gradatamente la sua attività fotografica, mentre l'uranio rimasto in soluzione era fotograficamente inattivo, ma riacquistava col tempo la facoltà di agire sui sali d'argento. Più tardi poi il medesimo Becquerel separò l' Ur-X facendo bollire una soluzione di cloruro d'uranio addizionato con nero fumo,

separando quest'ultimo e riscaldandolo in contatto dell'aria (126).

Se in queste esperienze, invece di valutare la radioattività col metodo fotografico, si ricorre al metodo elettrico, cioè alla ionizzazione che i corpi radioattivi producono nei gas, si ha un risultato differente, giacchè l'Ur-X si mostra assai poco attivo, mentre la radioattività dell'uranio rimasto in soluzione non appare indebolita. Questa differenza di risultati, che per un certo tempo diede luogo a confusione, si spiega rammentando, che la ionizzazione dei gas è sopratutto prodotta dai raggi α, i quali poi agiscono sui preparati fotografici in grado assai lieve, mentre i raggi β, ionizzatori relativamente deboli, producono azioni fotografiche assai più marcate. Ma anche il metodo elettrico dà gli stessi risultati del metodo fotografico se, fra l'aria che circonda l'elettrometro e destinata ad essere ionizzata, ed il corpo radioattivo, si colloca una lastrina, per esempio di alluminio, capace di arrestare i raggi α senza indebolire sensibilmente i raggi β. E lo stesso risultato si ha pure se me-

diante una lastra di piombo di alcuni millimetri di spessore si lasciano giungere all'elettrometro i soli raggi γ, perchè, come fu detto, questi si comportano sempre in modo proporzionale ai β a cui vanno congiunti.

Da queste esperienze bisognò concludere, che l'Ur-X emette soltanto i raggi β (e i raggi γ che li accompagnano), mentre l' uranio rimasto in soluzione emette soltanto raggi α. Se non che recentissime esperienze dei Signori Moore e Schmidt (127) hanno dimostrato che l' Ur-X, insieme ai raggi β, emette pure raggi α. Questi autori hanno trovato un metodo col quale la separazione dell' Ur-X avviene in modo assai più perfetto che col metodo di Crookes, e che consiste nel fare una soluzione di nitrato d'uranio puro nell' acetone (oppure acetato di metile, acetato di etile, alcool, ecc.), ed aggiungervi dell' idrossido di ferro precipitato di recente. Il precipitato che allora si forma contiene l' uranio X, mentre il liquido ne rimane completamente privo.

Quando, dopo trascorso un tempo sufficiente, l'uranio, cui fu tolto l'Ur-X, ha riacquistato la

proprietà di emettere raggi β, si può ricavare da esso una nuova quantità di Ur-X, ripetendo il trattamento chimico descritto più sopra. Nasce dunque affatto spontanea l' ipotesi, che l' Ur-X si formi in seguito ad una trasformazione degli atomi dell' uranio, mentre alla sua volta l' Ur-X si trasformi in una sostanza nuova tuttora sconosciuta.

Adottando questa ipotesi, che è appunto quella di Rutherford e Soddy, la spiegazione dei fatti precedenti diviene chiarissima. L' uranio rimasto in soluzione è il vero uranio, elemento chimico da tempo conosciuto. Esso è costituito da atomi non stabili, cosicchè qualcuno di essi si trasforma continuamente in modo da scindersi in due parti, cioè una particella α, lanciata con grande velocità, e un nuovo atomo, quello dell' Ur-X. Questo nuovo corpo è instabile esso pure, ed il suo atomo emette alla sua volta una particella α, nonchè un elettrone β. Ne rimane un nuovo atomo, tuttora sconosciuto, privo di sensibile radioattività. L' uranio, quale si ricava dai suoi minerali, consta dunque di tre sostanze

diverse, e cioè: 1.° dell'Ur vero e proprio, di cui un' esigua porzione si trasforma continuamente in Ur-X emettendo raggi α; 2.° della piccolissima quantità di questo Ur-X, che emette raggi α, β (e γ), trasformandosi continuamente in una sostanza non radioattiva; 3.° della piccolissima quantità di quest' ultima sostanza, che va accumulandosi. La costanza di proprietà del miscuglio dipende dall' essere stata raggiunta coll' andar del tempo una sensibile compensazione fra l' Ur-X generato e quello che in pari tempo si distrugge, e dall' essere estremamente piccola la parte di Ur che continuamente si trasforma in Ur-X. La diminuzione dell' uranio, che ha luogo in causa della trasformazione, è anzi così esigua, che non sarebbe possibile constatarla colla bilancia, neppure dopo un'intervallo di centinaia e migliaià di anni. E qui non si può a meno di ammirare l'immensa portata, che i mezzi fisici di ricerca della radioattività hanno potuto acquistare. Un tempo si considerava come prodigiosa la sensibilità dell' analisi spettroscopica, che permetteva di scoprire in un miscuglio gassoso, per

mezzo dell' esame della luce emessa dal medesimo, quantità così piccole di certe sostanze da sfuggire ad ogni più accurata ricerca chimica. Oggi si riesce a mettere in evidenza delle quantità di materie radioattive incomparabilmente più piccole ancora, di seguire le fasi della loro esistenza e di studiarne molte proprietà chimiche e fisiche.

L' esistenza della detta compensazione fra il prodursi e il distruggersi dell' Ur-X si esprime dicendo, che l' uranio ordinario è in *equilibrio radioattivo*. L' ammettere queste continue e lente trasformazioni atomiche dell' uranio non può offrire nessuna ripugnanza, dopo che la natura materiale delle emanazioni prodotte dal radio e dal torio è stata dimostrata nel modo più sicuro, e dopo che si è constatato, che di dette emanazioni quei corpi sono sorgenti, per così dire, inesauribili, ciò che esclude il dubbio che esse consistano in gas occlusi.

Lo studio delle leggi con cui la radioattività delle emanazioni, dell' Ur-X e degli altri prodotti dotati di radioattività temporanea, diminuisce

coll' andar del tempo, come pure quello della legge secondo la quale quei corpi, che, dopo essere stati privati con un processo opportuno della proprietà radioattiva, la ricuperano a poco a poco (in seguito al rigenerarsi della sostanza radioattiva che ad essi era stata sottratta), si sono mostrati d' importanza capitale. È anzi in seguito alla conoscenza di tali leggi, che si sono potute scoprire e studiare le molteplici trasformazioni, che subiscono successivamente gli atomi dei corpi radioattivi.

Le esperienze atte a scoprire queste leggi si fecero soprattutto col metodo elettrico, misurando a dati momenti la carica (oppure la scarica) per minuto secondo d' un elettrometro, prodotta in causa della ionizzazione del gas esposto all' azione della sostanza radioattiva, o, in altri termini, misurando l' intensità della corrente prodotta. Si può assumere questa intensità come misura della radioattività, ossia come proporzionale al numero di particelle α o β emesse nell' unità di tempo. Le misure di questo genere, eseguite nel caso dell' Ur-X, hanno mostrata valida una legge,

che a filo di logica poteva agevolmente essere prevista.

Consideriamo una sostanza temporaneamente radioattiva, per esempio l'Ur-X. In ogni unità di tempo un certo numero di atomi si trasforma, ed è evidente che, se si impiegasse una quantità doppia, o tripla, ecc. di detta sostanza, il numero di atomi trasformati nell'unità di tempo diverrebbe esso pure doppio o triplo, ecc.

Dunque per ogni data sostanza esiste un rapporto costante fra il numero degli atomi, che nell'unità di tempo si scompongono, ed il numero di atomi ancora interi. Questo rapporto, che si suol rappresentare colla lettera λ, si chiama *costante radioattiva*, od anche *costante di trasformazione*. Essa caratterizza ogni sostanza determinata; tanto più è piccolo il suo valore numerico, e tanto più è lenta la trasformazione. Nel caso dell'Ur-X si ha $\lambda = 0,000\,000\,36$, cioè 36 su 100 milioni di atomi si spezzano ogni minuto secondo, ovverossia 1 su 2 800 000. Si tratta qui di una trasformazione assai lenta. L'emanazione dell'attinio fornisce l'esempio della più

rapida delle trasformazioni finora conosciute, giacchè in tal caso è $\lambda = 0,18$, e cioè circa la sesta parte degli atomi presenti si scompone in ogni minuto secondo.

Poichè, man mano che gli atomi si trasformano, il numero di quelli ancora inalterati va necessariamente diminuendo, così diminuirà coll'andar del tempo anche il numero di quelli che si scompongono in ogni minuto secondo; quando, per esempio, metà della sostanza si è già trasformata, a metà si riduce pure quest'ultimo numero, per cui la ionizzazione prodotta dai raggi emessi diminuisce continuamente, prima con grande rapidità, poi di più in più lentamente. Con vocabolo matematico una legge di questa specie si chiama legge *esponenziale*. Orbene, le esperienze eseguite sopra una sostanza isolata temporaneamente radioattiva come l'Ur-X, hanno confermata la validità della legge esponenziale (*).

(*) Sia N il numero d'atomi esistenti all'istante t nella sostanza considerata e λ la sua costante di trasformazione. Il numero di atomi che si trasformano nell'unità di tempo è λN; quindi, nell'intervallo infinitesimo dt, si

Il diverso grado di radioattività dei corpi, invece che col valore numerico della costante λ, si può esprimere anche in un altro modo, cioè indicando il tempo T che si richiede affinchè la radioattività del corpo si riduca a metà del suo valore, ossia metà della sostanza siasi trasformata. Per l'uranio-X questo tempo ha il valore di 1 925 429 secondi, ossia 22 giorni circa; per l'emanazione dell'attinio si ha invece $T = 3{,}9$ secondi. È facile trovare T quando è noto λ, o viceversa. Così per calcolare T, se si conosce λ,

trasformano $\lambda N dt$ atomi, ed il numero di quelli rimasti interi diminuisce d'altrettanto. Dicendo $-dN$ questa diminuzione, si avrà:

$$dN = -\lambda N dt,$$

da cui si ricava facilmente

$$N = N_0 e^{-\lambda t},$$

dicendo N_0 il numero di atomi costituenti la sostanza all'istante $t = o$. Siccome poi la ionizzazione prodotta dai raggi emessi è proporzionale al numero di atomi che si trasformano, come pure alla corrente I dovuta alla ionizzazione, si potrà scrivere altresì:

$$I = I_0 e^{-\lambda t}.$$

basta dividere il numero 0,69314719 per λ (*). Il tempo T si può chiamare *periodo di trasformazione.*

Quando un corpo viene liberato dalla sostanza radioattiva, che egli genera continuamente, per esempio quando l' uranio viene liberato dall'Ur-X e perciò cessa di emettere raggi β, e poi viene lasciato a se stesso, egli riacquista a poco a poco, come già si è detto, la radioattività perduta. *La* legge con cui questa cresce coll'andar del tempo è precisamente quella che la teoria fa prevedere, e cioè la radioattività cresce secondo la stessa legge esponenziale, colla quale il prodotto separato (Ur-X nel caso dell' uranio) perde la sua radioattività (**). Una breve riflessione permette

(*) Se si suppone $I = \frac{1}{2} I_0$, la formola della precedente nota diviene

$$\frac{1}{2} = e^{-\lambda T}$$

ossia $\lambda T = log_e 2$, cioè

$$\lambda T = 0,69314719.$$

(**) La legge, secondo la quale risorge in un corpo la radioattività perduta, si può stabilire nel modo seguente. Per maggior chiarezza supporremo si tratti del ricupero

di rendersene conto. La sostanza primitiva, per esempio l'uranio liberato dall'Ur-X, genera questa sostanza in modo continuo, e siccome la frazione di uranio che si trasforma nell'unità di tempo è piccolissima, così la produzione di Ur-X può considerarsi come uniforme, e la quantità

per parte dell'uranio della proprietà di emettere raggi β, dopo che da esso sia stato separato l'Ur-X. Sia μ la costante di trasformazione dell'uranio, λ quella dell'Ur-X. Siano inoltre Q il numero di atomi d'uranio all'epoca t, Q_0 quello all'epoca $t = o$, che supponiamo essere quella in cui l'uranio restò privato dell'Ur-X che conteneva. Sia infine q il numero d'atomi di Ur-XX esistenti all'istante t. Questo numero q tende a crescere continuamente, perchè l'uranio seguita a creare l'Ur-X, mentre d'altra parte tende a diminuire, perchè l'Ur-X alla sua volta si trasforma. Nell'intervallo dt l'aumento è $\mu Q dt$, cioè proporzionale al numero Q di atomi di uranio esistenti; la diminuzione è $\lambda q dt$, cioè proporzionale al numero di atomi q di Ur-X, Si avrà dunque:

$$dq = (\mu Q - \lambda q)\, dt.$$

E siccome l'uranio diminuisce di quantità secondo la legge esponenziale:

$$Q = Q_0\, e^{-\mu t},$$

si avrà:

$$dq = (\mu Q_0\, e^{-\mu t} - \lambda q)\, dt$$

di Ur-X tende a crescere senza limite. Se non che l'Ur-X è esso pure radioattivo e si trasforma gradatamente in una sostanza successiva sconosciuta secondo la legge esponenziale precedente. Ne consegue che l'Ur-X aumenterà col tempo (e quindi aumenterà l'emissione di raggi β che

La soluzione di questa equazione è:

$$q = Ae^{-\mu t} + Be^{-\lambda t},$$

purchè si ponga $A = \frac{\mu Q_0}{\lambda - \mu}$. E siccome per $t = o$ si deve avere $q = o$, ne risulta $B = - A$.

Si trova dunque:

$$q = \frac{\mu Q_0}{\lambda - \mu} (e^{-\mu t} - e^{-\lambda t}).$$

Questa formula esprime la legge generale secondo cui varia col tempo la radioattività di una sostanza (Ur-X), prodotta in modo continuo da una sostanza (Ur), e trasformantesi continuamente in una terza sostanza inattiva, ammesso che anche la sostanza originale sia inattiva, in rapporto alla specie di raggi (β nel caso concreto) che si considerano.

Ma nella maggior parte dei casi la costante μ, relativa alla prima trasformazione, è piccolissima in confronto di λ. Per esempio, mentre il periodo T di trasformazione dell'Ur-X è, come si è detto, di 22 giorni, quello dell'uranio può valutarsi a 600 milioni di anni (128). E poichè le costanti radioattive λ sono in ragione inversa dei periodi di trasformazione T, si vede quanto sia piccolo μ in con-

da esso proviene), e questo aumento riferito all'unità di tempo sarà la differenza fra l'aumento uniforme predetto e la diminuzione secondo la legge esponenziale.

Le trasformazioni del torio sono assai più complicate di quelle dell'uranio, giacchè, mentre

fronto di λ. Tenendo conto della sola prima potenza di μ nel valore di q si avrà:

$$q = (q)_{\mu = o} + \mu \left(\frac{dq}{d\mu}\right)_{\mu = o},$$

ossia

$$q = \frac{\mu}{\lambda} Q_o (1 - e^{-\lambda t}).$$

Dicendo I l'intensità all'istante t della corrente che serve di misura alla radioattività, ed I_∞ quella che si avrebbe dopo un tempo lunghissimo, si avrà dunque:

$$I = I_\infty (1 - e^{-\lambda t}).$$

Cioè la radioattività risorge nell'uranio colla stessa rapidità e collo stesso andamento con cui essa diminuisce nel prodotto radioattivo (Ur-X), quando viene studiato a parte.

Il sig. Rutherford (129) giunge allo stesso risultato tenendo conto sin da principio della estrema lentezza di trasformazione della sostanza radioattiva primitiva (Ur), e cioè suppone costante il numero di atomi della sostanza nuova (Ur-X) generati in ogni unità di tempo. Il metodo qui seguito ha il merito di fornire anche l'espressione esatta di q, oltre quella approssimativa corrispondente a μ piccolissimo.

il torio si trasforma in Tr-X, questo, anzichè trasformarsi in una sostanza inattiva, dà come prodotto una emanazione gassosa, e questa si trasforma alla sua volta in quella sostanza solida che, depositata sulla superficie dei solidi coi quali giunge in contatto, produce la cosidetta radioattività indotta. Naturalmente questo deposito si formerà anche nella massa stessa del torio, per cui in questo corpo, quando sia in equilibrio radioattivo, si troveranno almeno quattro diverse sostanze, oltre al torio, e cioè il Tr-X, l'emanazione, occlusa allo stato gassoso, il deposito che dà luogo alla radioattività indotta, ed il corpo in cui questo deposito si trasforma. E mentre la quantità di torio andrà lentamente diminuendo, e quella della sostanza finale andrà aumentando, la quantità di ciascuna delle intermedie resterà invariabile, per esservi compenso fra la produzione ed il consumo.

Vedremo che in realtà le cose sono anche più complicate di quanto si è detto; tuttavia, per dare idea dei metodi impiegati in tali ricerche,

sarà bene descrivere come si sono scoperte e studiate le prime trasformazioni del torio.

I Signori Rutherford e Soddy (130) aggiungendo ammoniaca ad una soluzione d'un sale di torio ottennero un precipitato, la cui attività era minore della metà dell'attività primitiva, mentre il liquido, che ai reagenti appariva privo di torio, dava, una volta tirato a secco e fortemente riscaldato per scacciare il sale di ammonio, un lieve residuo, che a peso eguale era migliaia di volte più attivo del torio. Essi chiamarono torio-X (Tr-X) la sostanza radioattiva contenuta in quel residuo.

Coll'andar del tempo il Tr-X perde la sua attività, mentre il torio precipitato la ricupera. L'esame delle radioattività si fa col metodo elettrico; e siccome l'interposizione d'una laminetta di mica sopprime ogni azione, così se ne conclude che quelle due sostanze, Tr e Tr-X, emettono solo raggi α. Le variazioni col tempo della loro radioattività seguono, del resto, le solite leggi esponenziali (almeno se si fa astra-

zione dalle prime misure fatte dopo la separazione del Tr-X dal Tr), benchè, a differenza di ciò che accade per l'uranio, il prodotto X dia luogo ad altre sostanze radioattive. La ragione di questa coincidenza sta in ciò, che l'emanazione, che viene generata dal Tr-X si elimina in gran parte allo stato gassoso.

Ma durante un certo tempo, subito dopo la separazione del Tr-X dal Tr, si osserva un diverso andamento nei fenomeni, giacchè la radioattività del Tr comincia col diminuire sino ad un minimo prima di crescere. Ciò si deve alla circostanza che, mentre l'ammoniaca toglie al Tr, supposto inizialmente in equilibrio radioattivo, la sostanza Tr-X, che è solubile, non lo libera però dai depositi che originano l'attività indotta. Essi, non più continuamente generati dalla emanazione, che naturalmente resta eliminata insieme al Tr-X, si trasformano gradatamente, dando luogo così alla diminuzione iniziale della radioattività del torio. Similmente il Tr-X comincia, per un'analoga ragione, col mostrare

per un certo tempo una radioattività crescente, prima di decrescere regolarmente.

Come si vede, i fenomeni osservati rimangono spiegati in modo assai semplice. Ma poteva rimanere un dubbio circa l'ordine di successione delle trasformazioni, e cioè se l'emanazione è, per così dire, veramente figlia del Tr-X, come si è ammesso, o invece è generata dal Tr. Appropriate esperienze hanno messo in chiaro la cosa. Per esempio, il Tr-X, posto in una corrente gassosa, fornisce sin da principio l'emanazione, mentre il torio precipitato dall'ammoniaca non ne produce dapprima in modo sensibile, ma solo ne dà, mano a mano che in esso si ricostituisce il Tr-X.

Recenti numerosissime esperienze fatte sul torio hanno poi dimostrato, che il prodotto solido, in cui si trasforma l'emanazione, non è omogeneo, ma è costituito da almeno tre sostanze radioattive, che si designano coi nomi di Tr-A, Tr-B, Tr-C. L'emanazione si trasforma nel prodotto A, questo in quello B, questo nel C, ed

il prodotto C in un prodotto finale ignoto, non sensibilmente radioattivo. Sembra altresì ormai dimostrato, che il Tr-X non sia generato direttamente dal Tr, ma che esista fra i due un prodotto intermedio, e cioè quella sostanza a cui il Sig. Ramsay (131) diede il nome di *radiotorio.* Questa sostanza, che venne estratta da un minerale assai ricco in elio, detto torianite, è assai più radioattiva del torio, e dà prodotti di trasformazione simili a quelli di questo elemento, mentre ha proprietà chimiche che la fanno somigliare ai metalli delle terre rare. Quasi nello stesso tempo il Sig. Hahn (132) giungeva al medesimo risultato, mentre il Sig. Blanc (133) estraeva dai fanghi d'Échaillon e di Salins-Moutier in Savoia una sostanza radioattiva, la quale alla fine si è identificata col radiotorio.

Dalle ricerche del Sig. Hahn risulta, che il radiotorio è veramente un prodotto di trasformazione del torio, contenuto in minime quantità nei minerali da cui quel corpo viene estratto, ed i Signori Elster e Geitel (134) sono giunti alla stessa conclusione. Ricerche recentissime dei

Signori Boltwood (135) e Dadourian (136) le confermarono, ed inoltre rendono assai probabile che il torio, quando si trasforma in radiotorio, non emetta nessuna radiazione, cioè nè raggi α, nè β, nè γ.

Le trasformazioni successive dell' attinio somigliano grandemente a quelle del torio. L' attinio dà come prodotto di trasformazione l' attinio-X, questo alla sua volta produce l' emanazione dell' attinio, la quale deposita prodotti solidi alla superficie dei corpi coi quali giunge in contatto, che successivamente subiscono varie trasformazioni, dando luogo alla radioattività indotta. Dalle recenti ricerche del Sig. Hahn (137) rimane stabilito, che fra l' attinio e l' attinio-X esiste un prodotto intermedio, analogo al radiotorio, e perciò denominato *radioattinio.*

Le successive trasformazioni del radio differiscono invece assai, non solo da quelle così poco numerose dell' uranio, ma altresì da quelle del torio e dell' attinio.

Non sembra esistere infatti nessun termine intermedio, analogo al radio-torio e al torio-X,

fra il radio e la sua emanazione gassosa. Questa risulterebbe quindi immediatamente dalla disaggregazione degli atomi del radio. Ma in compenso sono assai numerose le successive trasformazioni a tutt'oggi conosciute, che subisce l'emanazione.

Il deposito solido dell'emanazione, causa della radioattività indotta, non è un prodotto omogeneo, ma consta di almeno sette successive sostanze. Le prime sei sono state dal Rutherford chiamate radio-A, radio-B,.... radio-F, e ciascuna genera quella che la segue in ordine alfabetico. La prima, cioè il radio-A, è l'immediato prodotto della disaggregazione dell'atomo dell'emanazione; la penultima, cioè il radio-F, si trasforma in una settima sostanza, rimasta completamente sconosciuta perchè d'insensibile radioattività e perchè non si trasforma, a quanto pare, in altri prodotti sensibilmente radioattivi. Non bisogna infatti dimenticare, che la quantità dei prodotti radioattivi, coi quali si ha sempre a che fare, è tanto piccola, che passerebbe inosservata se non emettessero raggi α o β.

A proposito delle prime trasformazioni dell'uranio e del torio si è spiegato con qualche dettaglio, come le trasformazioni stesse si siano rivelate; ma si trattava allora di fenomeni relativamente semplici. Quando invece si debbano studiare corpi, i quali diano una lunga serie di successive trasformazioni atomiche, la discussione e la retta interpretazione delle esperienze destinate a dimostrarle divengono complicatissime. Tale complicazione si è presentata coi prodotti successivi alle emanazioni, e più specialmente con quelli del radio. Per dare un'idea che, volendo essere concisi, riescirà forse alquanto incompleta, dei metodi impiegati in tali difficili ricerche, sarà utile esporre brevemente le ricerche relative al radio, che sono quasi esclusivamente dovute al sig. Rutherford (138).

L'esistenza delle prime trasformazioni del radio, e cioè quella di questo corpo in emanazione, e di questa nel deposito cui si deve la radioattività indotta, risultarono dimostrate con un procedimento simile a quello impiegato per l'uranio, ed anzi in qualche modo più facil-

mente, perchè lo stato gassoso dell' emanazione dispensava dal ricorrere a tentativi di separazione chimica. La complicazione invece diviene assai grande quando si tratta di studiare i prodotti successivi.

Che la cosidetta radioattività indotta si debba ad uno strato invisibile di sostanza depositato dall'emanazione, è un fatto accertato. La sostanza deposta, benchè invisibile anche al microscopio, ed in sì esigua quantità da non alterare il peso del corpo cui aderisce, può sciogliersi in certi reagenti e asportarsi meccanicamente, per esempio collo sfregamento; ed allora la sua presenza si rivela nella soluzione o sul corpo con cui si operò la confricazione, in virtù della sua radioattività. Tenuto conto della sua minima massa, la sostanza depositata è indubbiamente migliaia di volte più radioattiva, a parità di peso, del radio.

Il fatto constatato, che il deposito radioattivo diviene abbondantissimo se il corpo esposto alla emanazione viene caricato negativamente, presenta intanto una seria difficoltà d'interpretazione. L'emanazione è radioattiva, ma emette

solo raggi α, come si può direttamente constatare; perciò sembrerebbe che, siccome ogni atomo di emanazione perde una particella positiva α e si trasforma così in un atomo di deposito radioattivo, questo dovesse restar carico negativamente, ed essere respinto anzichè attratto dai corpi aventi carica negativa. Nasce dunque il sospetto, che un atomo di emanazione, prima di divenire atomo del deposito radioattivo, subisca altre modificazioni non ancora conosciute.

Ma vi sono altre spiegazioni verosimili. Così il Rutherford suppose, che l'emanazione emetta insieme ai raggi α anche dei raggi β di piccolissima velocità e quindi difficilmente dimostrabili, ed in tal quantità, che l'atomo di emanazione, dopo la perdita della particella α e di due o più elettroni, resti negativo.

Certe esperienze della signorina Slater (139), secondo le quali un elettroscopio posto in un recipiente nel quale, dopo aver fatto un ottimo vuoto, si fa diffondere l'emanazione del torio o del radio, si scarica assai più rapidamente quando è carico positivamente che nel caso contrario,

furono interpretate appunto come effetto dell'emissione per parte dell'emanazione stessa, di elettroni dotati di piccola velocità. D'altra parte il sig. Makower (140) fu condotto a supporre in seguito ad altre esperienze che, quando un atomo di emanazione emette una particella α, tanto questa quanto il residuo dell'atomo (che per reazione sarà esso pure lanciato con velocità assai grande) siano privi di carica elettrica, ma poi quel residuo, in seguito agli urti contro le molecole gassose, si ionizzi perdendo un elettrone, e rimanga perciò elettrizzato positivamente. Anche questa spiegazione era stata preconizzata dal Rutherford.

Che le particelle, le quali stanno per depositarsi e formare la radioattività indotta, siano elettrizzate positivamente, risulta poi da esperienze del sig. Debierne (141), che ne ottenne la deviazione magnetica, e da altre del sig. Giesel (142), nelle quali invece agivano forze elettriche. Le une e le altre esperienze furono però effettuate coll'attinio, che dà un'emanazione assai più abbondante di quella del radio. Il Giesel, per

spiegare quelle sue notevoli esperienze, suppose l'esistenza di certi nuovi raggi speciali all'emanio (attinio), che chiamò raggi E; ma secondo il sig. Rutherford il fenomeno osservato, cioè una concentrazione di luminosità sopra un corpo fosforescente carico negativamente, è dovuto semplicemente alla carica positiva delle particelle provenienti dalla trasformazione della emanazione, le quali, una volta depositate, producono poi la radioattività indotta.

Comunque avvenga la formazione del deposito radioattivo per parte dell'emanazione del radio, le ricerche del Rutherford hanno dimostrato, che questo deposito è assai complesso.

Si introduca nell' aria carica di emanazione, che in una boccia chiusa sovrasta ad una soluzione di radio, un' asticella metallica carica negativamente, e dopo un certo tempo si tolga di là per accostarla ad un elettrometro. I raggi, che da essa partono ionizzando l' aria, la rendono conduttrice e determinano la deviazione dell'elettrometro. Questa deviazione, riferita all'unità di tempo, che è proporzionale alla quantità di elet-

tricità trasmessa dall'aria, ossia all'intensità della corrente così generata, servirà di misura alla radioattività dell'asticella. Se fra questa e l'aria contenuta nello strumento di misura non è interposto che un piccolo strato d'aria, l'effetto osservato sarà la somma di quelli prodotti dai raggi α, β, γ, se queste tre specie di raggi sono emesse dal corpo stesso; ma l'effetto dei β e dei γ sarà trascurabile rispetto a quello dei raggi α. Siccom però si ottengono indicazioni utili studiando separatamente i diversi raggi, così si fecero nuove misure dopo aver interposto una sottile lastra d'alluminio destinata ad arrestare i raggi α, e si studiò così l'effetto dei soli β e γ insieme, o sensibilmente soltanto quello dei raggi β, essendo l'effetto dei γ relativamente trascurabile. Interponendo poi una lastra di piombo di 6 o più millimetri di spessore, si isolarono i raggi γ, e si potè in tal modo studiare la loro azione sull'apparecchio di misura.

Quest'ultimo studio è oramai superfluo, essendosi ripetutamente constatata la reciproca pro-

porzionalità degli effetti delle due ultime specie di raggi.

Misurando più volte la radioattività dell' asticella in successivi istanti di tempo a partire dal momento in cui venne allontanata dall' emanazione, si riconosce, che la radioattività stessa decresce col tempo, ma con un andamento differente da quello definito dalla nota legge esponenziale, e che inoltre dipende dal tempo, durante il quale si lasciò agire l' emanazione.

Supponiamo di studiare dapprima il decrescere della radioattività rispetto ai raggi α, nel caso in cui il corpo reso attivo dall' emanazione sia rimasto solo per breve tempo, per esempio 1 minuto primo, a contatto di questa. Si riconosce allora che dapprincipio, e cioè per circa 10 minuti a partire dal momento in cui l' asticella venne tolta dall' emanazione, la radioattività decresce assai rapidamente, poi in modo gradatamente meno rapido, sinchè a partire dal quindicesimo minuto sino circa al trentacinquesimo essa rimane presso a poco constante, dopo di

che la perdita di radioattività si fa nuovamente più rapida. Durante il periodo iniziale la rapida diminuzione segue presso a poco la legge esponenziale, ed il tempo T, richiesto a ridurre la radioattività a metà del suo valore, è di circa 3 minuti primi, ciò che corrisponde al valore $\lambda = 0{,}00385$ della costante di trasformazione. Nell' ultimo periodo di decrescimento si ha ancora un andamento quale viene assegnato dalla legge esponenziale, ma in questo caso $T = 19$ minuti primi circa (*), e quindi $\gamma = 0{,}00061$.

La fase intermedia, nella quale la radioattività è quasi invariabile, dura tanto meno quanto più lunga fu l' esposizione del corpo alla emanazione.

Questi primi risultati mostrano intanto, che il deposito radioattivo non è omogeneo, e che

(*) Secondo il sig. Rutherford si avrebbe invece $T = 28'$; ma esperienze recenti del sig. Bronson (143), che sembrano assai concludenti, conducono al valore qui adottato, che, come si vedrà fra poco, spetta al prodotto radioattivo radio-C. Anche per il radio-B adotteremo il valore $T = 26'$ dato dal sig. Brouson, invece del valore $T = 21'$ trovato dal sig. Rutherford.

probabilmente contiene due prodotti radioattivi, ai quali spettano i valori $3'$ e $19'$ per il tempo T necessario a ridurre di metà la radioattività loro.

Ma quando si abbia un miscuglio di più sostanze radioattive A, B, C...., ognuna delle quali si trasforma nella successiva secondo la legge esponenziale, è facile trovare la legge colla quale l'attività del miscuglio varia col tempo, se sono note le costanti λ relative a ciascuna trasformazione, o, ciò che vale altrettanto, i tempi T richiesti da ciascuna sostanza, perchè l'attività sua si riduca a metà del valore primitivo (144). Si potrà dunque vedere se due prodotti, per i quali si abbia $T = 3'$ e $T = 19'$, possano dare risultati numerici concordanti con quelli dati dalle misure. Si è riconosciuto che ciò non è possibile, mentre invece si riesce a rappresentare bene i risultati sperimentali supponendo: 1.° che l'emanazione ha generato un prodotto A, che emette i raggi α e pel quale è $T = 3'$; 2.° che A si trasforma in un prodotto B, che non emette raggi α e pel quale è $T = 26'$; 3.° che B si trasforma in un terzo prodotto C, che come A

emette raggi α, e pel quale si ha $T = 19'$; 4.° che C si trasforma in un prodotto, o in più prodotti successivi, tutti però non sensibilmente radioattivi.

Esaminando il comportamento dei raggi β (oppure quello dei raggi γ) si ha un risultato alquanto differente. Se l'esposizione all'emanazione fu assai breve, la radioattività, dapprima quasi impercettibile, comincia col crescere da zero sino ad un massimo, che viene raggiunto in circa $36'$, poi cala di nuovo, finchè, trascorse alcune ore, l'andamento diviene quello della legge esponenziale, con $T = 19'$. Invece, se il corpo fu per lungo tempo a contatto dell'emanazione, si osserva sin da principio una forte azione, che poi diminuisce col tempo. In breve si rende conto in modo completo di tutti i fatti osservati ammettendo, che il terzo soltanto dei prodotti precedenti, e non i primi due, oltre ai raggi α, emetta anche raggi β e γ (*).

(*) Secondo il sig. Bronson (145) il radio-B emette raggi β pochissimo penetranti, e che quindi possono in molti casi passare inosservati.

Le differenze osservate, studiando l' effetto dei raggi β con diverse durate di esposizione all'emanazione, si spiegano assai facilmente. Con breve durata si ottiene quasi unicamente il radio-A, che poi poco a poco produce il radio-B, e questo alla sua volta il radio-C; e se solo quest' ultimo prodotto emette i raggi β, essi non si manifesteranno che dopo un certo tempo, ed in quantità dapprima crescente. Con lunga durata i tre prodotti esistono sino dall' inizio delle misure, e perciò sin dal principio i raggi β esistono, ma la loro quantità decresce col tempo, per il graduale esaurirsi del prodotto *C* e dei prodotti precedenti.

Nè qui terminano le trasformazioni oggi note del radio. La signora Curie riconobbe (146), che i corpi lungamente esposti all'emanazione del radio acquistano una radioattività indotta, che, quantunque debolissima, può durare mesi ed anni. Bisogna dunque ritenere, che il radio-C non dia come prodotto di trasformazione una sostanza inattiva, ma una dotata di lieve radioattività. Con metodi simili a quelli che gli per-

misero di riconoscere i prodotti radio-A, -B, -C, il signor Rutherford ha trovato, che il radio-C si trasforma in radio-D, questo in radio-E, che alla sua volta produce radio-F; e che il radio-D non emette raggi, il radio-E emette i raggi β e γ, ed il radio-F emette solo raggi α. Il valore di T per questi tre prodotti sarebbe rispettivamente e all'incirca 40 anni, 6 giorni e 143 giorni. Si tratta dunque di deboli radioattività e di trasformazioni oltremodo lente. Per quanto oggi si sa, il radio-F dà un prodotto non sensibilmente radioattivo.

Questi risultati vennero poi confermati, tosto che si trovò modo di isolare qualcuno di quei prodotti radioattivi con metodi chimici o fisici. Per esempio, introducendo dell'acido solforico in un tubo di vetro, in cui era rimasto per un mese l'emanazione emessa da 30 milligrammi di bromuro di radio, si ottenne una soluzione radioattiva. Delle lastre di bismuto, lasciate per alcune ore immerse in questo liquido, divennero radioattive, con emissione di soli raggi α, e con un

valore per T precisamente di 143 giorni. Si era così isolato il prodotto radio-F.

Sembra oggi accertato che il polonio o radio-tellurio altro non sia che questo radio-F, come pure che il cosidetto radio-piombo consista nel miscuglio dei tre prodotti a lenta trasformazione, cioè radio-D,-E ed-F. Poichè la pechblenda contiene radio, è naturale che vi si trovino anche i suoi successivi prodotti di trasformazione; e siccome essi si differenziano l'un dall'altro per il diverso comportamento chimico, si comprende come mediante processi speciali si sia potuto ricavare dal suddetto minerale il radio-F o polonio, oppure il radio-piombo.

Merita speciale menzione il radio-D, che non emette raggi. Esso non potrebbe, a rigor di termine, chiamarsi radioattivo, benchè continuamente parte dei suoi atomi si trasformi in un diverso prodotto. Se il radio-D potesse prepararsi isolato ed in quantità tangibile, esso apparirebbe dapprincipio non radioattivo, ma lo diverrebbe col tempo in seguito all'accumularsi

dei prodotti *E* ed *F*. Ma se questi non fossero radioattivi, nulla rivelerebbe la continua trasformazione atomica, salvo dopo lunghissimo periodo di tempo, qualora il nuovo prodotto possedesse proprietà fisiche o chimiche differenti. Si comprende così, che anche i corpi considerati come stabili potrebbero lentamente trasformarsi a nostra insaputa.

Alcune ricerche fatte di recente sulle proprietà dei raggi α, e in particolare sul loro assorbimento per parte dei varî corpi, hanno condotto a risultati assai notevoli, fornendo un nuovo metodo per riconoscere l'esistenza di certe trasformazioni atomiche, qualora siano accompagnate dall'emissione di quei raggi.

In causa della loro massa di gran lunga maggiore, i raggi α si comportano diversamente dai β allorchè attraversano i varî corpi, e mentre un fascio di questi ultimi, che entri in un corpo, ne esce diffuso in ogni direzione, un fascio di raggi α conserva più a lungo una propagazione sensibilmente rettilinea. Però l'assorbimento dei raggi α è assai più grande che quello dei β, co-

sicchè oltre ad una certa distanza gli effetti dei primi scompaiono. Questa distanza è di alcuni centimetri per i gas all'ordinaria pressione, e varia per un dato gas presso a poco in proporzione di questa. Lo spessore massimo di corpi diversi, che i raggi α devono traversare, perchè cessino di manifestarsi, è tanto minore, quanto maggiore è la densità dei corpi stessi; per cui, quando si tratta di corpi solidi, bastano grossezze piccole per arrestarli completamente. Questi fatti si sogliono esprimere dicendo, che i varî corpi assorbono i raggi α. Ma il meccanismo del fenomeno consiste semplicemente nella perdita di velocità, che soffrono le particelle α urtando le molecole del corpo che devono attraversare. Una tale diminuzione di velocità è stata recentemente constatata dal sig. Becquerel (147) nel caso d'una sottile lamina d'alluminio posta sul cammino dei raggi α. Il modo nel quale si produce tale diminuzione di velocità è particolarmente chiaro, quando si tratti del passaggio attraverso un gas. Infatti l'energia necessaria alla ionizzazione delle molecole di questo è certo fornita dall'energia

di moto delle particelle α, per cui ad ogni molecola ionizzata corrisponde una brusca diminuzione della loro velocità. Se per brevità di linguaggio chiamiamo *portata* delle particelle α lo spessore di un dato corpo che devono attraversare, perchè i loro effetti scompaiano completamente, è evidente, che questa portata sarà diversa pei varî prodotti radioattivi, se le velocità dei raggi α da essi emessi sono differenti. Si noti, che si parla qui di effetti in genere e non d'un effetto particolare dei raggi α, e ciò per la ragione che tanto la ionizzazione, quanto la fosforescenza e l'azione fotografica, cessano bruscamente insieme al di là di una certa distanza dal corpo radioattivo (148). Si può anzi ricorrere ad uno qualunque di questi effetti per misurare la portata nell'aria dei raggi α. Il mezzo più comodo, specialmente per semplici esperienze dimostrative, è quello di accostare al corpo radioattivo uno schermo fosforescente di solfuro di zinco, come quello dello spinteriscopio. La scintillazione comincia d'un tratto, quando lo schermo arriva a tal distanza da poter essere raggiunto dai raggi α.

Si potrebbe supporre che, quando le particelle α cessano di produrre i consueti effetti, la loro velocità sia ridotta piccolissima; ma così non è, giacchè quella minima velocità è circa due quinti di quella con cui i raggi α sono espulsi dal radio-C, cioè da quello dei prodotti del radio, che imprime ai raggi stessi la velocità più grande. Potrà sembrar strano, che con velocità di più migliaia di chilometri al secondo le particelle α più non si manifestino in alcun modo; ma può darsi che le deviazioni dalla direzione primitiva, dovute agli urti, divengano di più in più notevoli man mano che cala la velocità delle particelle, e che si arrivi alla fine ad una diffusione in tutti i sensi, come quella che presentano in maggior grado i raggi β. Comunque possa spiegarsi il fatto, esso conduce nondimeno ad un'importante conseguenza, e cioè che i corpi considerati come non radioattivi potrebbero esserlo senza che potessimo accorgercene, se emettessero raggi α con velocità minori di quella superiormente indicata.

Importanti esperienze sulla portata dei raggi α si debbono ai signori Bragg e Kleeman (149), i quali ricorsero principalmente al metodo elettrico. L'apparecchio adoperato è costituito da una lastra metallica elettrizzata comunicante coll'elettrometro, a pochi millimetri dalla quale è tesa una rete metallica comunicante col suolo. L'insieme dei due conduttori può avvicinarsi più o meno al corpo radioattivo, i raggi α del quale formano, mercè l'uso di opportuni diaframmi metallici, un fascio rettilineo che, se il corpo radioattivo non è troppo lontano dall'apparecchio di misura, giungerà all'aria da ionizzare, cioè all'aria compresa fra la lastra elettrizzata e la reticella.

Quando l'apparecchio di misura viene accostato gradatamente al corpo radioattivo, l'effetto dei raggi α dapprima cresce durante l'avvicinamento sino ad un certo valore massimo. Questo aumento iniziale è dovuto allo spessore non trascurabile dello strato radioattivo. Infatti i raggi α partenti dalla superficie dello strato, hanno nell'aria la loro intera portata, mentre quelli che

provengono dall' interno perdono velocità prima di uscire e la loro portata è ridotta.

Continuando ad accostare lo strumento di misura al corpo radioattivo si nota poi una diminuzione di effetto alle piccole distanze, ciò che dimostra che la ionizzazione prodotta dalle particelle α è massima quando esse posseggono una certa speciale velocità, e diviene minore se la velocità loro è ancor più grande.

Questo fatto singolare si verifica del resto anche pei raggi β. Così per esempio trovò il sig. Durack (150), che nell' aria alla pressione di 1 mm. gli elettroni costituenti raggi catodici, ed animati da una velocità di 50 mila chilometri, ionizzano in media una molecola del gas per ogni percorso di 5 centimetri, mentre gli elettroni emessi dal radio, dotati di una velocità più che tre volte maggiore, ionizzano una molecola ogni 10 centimetri di cammino.

A cognizione di chi scrive non si è ancora data una soddisfacente spiegazione di questo fatto, che sembra contrario ad ogni aspettativa, in quanto che si è tentati di credere che la ioniz-

zazione del gas debba essere tanto più abbondante, quanto più grande è la velocità posseduta dalle particelle in moto, dall'urto delle quali risulta la ionizzazione stessa. Sembra però che una spiegazione attendibile possa ricavarsi dalla considerazione seguente.

Verosimilmente le particelle in moto assai di rado urterebbero le molecole del gas, se queste non le deviassero dal loro cammino rettilineo. Consideriamo per esempio il caso di una delle particelle α formanti i raggi di questo nome. Allorchè giunge ad una distanza abbastanza piccola da una molecola gassosa, agirà sulla particella una forza elettrica, e cioè la risultante delle forze provenienti dai singoli elettroni delle due specie costituenti la molecola stessa, la quale risultante era sensibilmente nulla, allorchè la particella era abbastanza lontana dalla molecola. Questa risultante, a seconda della posizione relativa della molecola e della particella, potrà avere qualsiasi direzione; ma in quei casi in cui essa ha per effetto un ulteriore avvicinamento della particella alla molecola, l'equilibrio di questa

potrà rimanere così perturbato da determinarne la scissione in ioni. Ora è chiaro, che la deviazione della particella sarà tanto più piccola, quanto più grande sarà la velocità con cui la particella si muove. Perciò, mentre particelle dotate di velocità piccola possono non possedere un' energia sufficiente per ionizzare il gas, particelle dotate di velocità grandissima, pur avendo energia ad esuberanza, daranno scarsa ionizzazione, perchè troppo difficilmente deviate. Si comprende così come per valori intermedi della velocità si abbia la massima ionizzazione.

Facendo astrazione dagli effetti che nell'esperienza descritta si producono alle piccole distanze, supponiamo che lo strato radioattivo, preso per quanto è possibile sottile, consti di un miscuglio di prodotti radioattivi diversi, i quali emettano raggi α dotati di diverse velocità. È facile comprendere, che gli effetti ottenuti, accostando gradatamente l'apparecchio di ionizzazione, saranno tali, da rivelare questo stato di cose. Infatti si manifesterà dapprima per una certa distanza, che è uguale alla portata dei raggi più veloci,

l' azione di questi soli raggi; aggiungeranno il loro effetto a quello dei primi gli altri raggi meno veloci, non appena la distanza diventa eguale alla loro rispettiva portata. In tal modo, dallo speciale andamento delle successive misure si ricaveranno utili criterî intorno alla natura della sostanza radioattiva esaminata.

La portata dei raggi α nell' aria alla pressione ordinaria è una costante caratteristica d'ogni sostanza radioattiva che emetta simili raggi, tanto che essa sola basta a differenziare due sostanze, quand' anche abbiano in comune altre proprietà. Essa è stata misurata con cura per diversi corpi da varî sperimentatori.

A riassumere le conoscenze attuali intorno alle sostanze radioattive e alle loro successive trasformazioni, varrà il quadro seguente.

La prima colonna di esso contiene i nomi dei prodotti radioattivi costituenti le 4 famiglie oggi conosciute, dell' uranio, del torio, dell' attinio, e del radio. Per ciascuna famiglia la prima sostanza si trasforma in quella il cui nome è scritto al di sotto del suo, questa nella successiva

e così di seguito. Nella seconda colonna è scritto il tempo T necessario perchè metà della sostanza, indicata a fianco nella prima colonna, si trasformi in quella che sta sotto. Se invece dei valori T si volessero conoscere quelli della costante radioattiva o costante di trasformazione λ, bisognerebbe dividere il numero 0,69314719 per il valore di T espresso in minuti secondi, come si è detto altrove. La terza colonna indica quali raggi emetta la sostanza radioattiva, mentre si trasforma nel prodotto successivo. Infine la quarta colonna dà in centimetri la portata, definita più sopra, dei raggi α nell' aria all' ordinaria pressione.

Corpi radioattivi	*T*	Raggi	Portata dei raggi α
Uranio.	—	α	3,5
Uranio-X	22 giorni	α, β, γ	—
?	—	—	—
Torio	—	?	—
Radiotorio	—	α	3,9
Torio-X	4 giorni	α	5,7
Emanazione del torio .	54 secondi	α	5,5
Torio-A	10,6 ore	—	—
Torio-B	1 ora	α	5
Torio-C	qualche secondo	α, β, γ	8,6
?	—	—	—
Attinio.	—	—	—
Radioattinio	20 giorni circa	α	4,8
Attinio-X	10,2 giorni	α	6,55
Emanazione dell'attinio	3,9 secondi	α	5,8
Attinio-A	36 minuti primi	—	—
Attimio-B.	3 minuti primi	α, β, γ	5,5
?	—	—	—
Radio	1300 anni circa	α	3,5
Emanazione del radio .	3,8 giorni	α	4,23
Radio-A.	3 minuti primi	α	4,83
Radio-B	26 minuti primi	β (lenti) γ	—
Radio-C.	19 minuti primi	α, β, γ	7,06
Radio-D.	40 anni circa	—	—
Radio-E	6 giorni	β, γ	—
Radio-F.	143 giorni	α	3,86
?	—	—	—

A giustificazione e schiarimento di qualcuno dei dati inseriti in questo quadro valgano le seguenti osservazioni. Fino a poco tempo fa si è creduto che l' uranio-X emettesse soltanto raggi β e γ; ma, come fu detto più sopra, è stato dimostrato dai signori Moore e Schmidt (127) che esso emette altresì raggi α. Infatti questi fisici, misurando il decrescere dell' attività dell' Ur-X tanto rispetto ai raggi α quanto rispetto ai β, hanno constatato, che l' attività stessa si riduce a metà in circa 22 giorni. L' essere T eguale a 22 giorni anche per i raggi α, esclude che essi siano dovuti a traccie di uranio rimaste nell' Ur-X.

I valori della portata pei raggi α sono tratti dalle determinazioni del sig. Hahn (151) per quanto riguarda i prodotti del torio e dell'attinio, e dallo stesso autore si è tratto il valore di T pel radioattinio. La portata dei raggi α nel caso dell' uranio e del radio è tolta dai risultati dei signori Bragg e Kleeman (152), salvo quella del radio-F, che è stata determinata dal sig. Levin (153). Infine, secondo recenti esperienze dei signori Meyer e von Scweidler (154), il radio-E consterebbe

di due prodotti distinti, per uno dei quali il periodo di tempo T sarebbe di 6 a 6 giorni e mezzo, e per l'altro di 4, 8 giorni.

Le varie sostanze, nelle quali si trasformano successivamente i quattro corpi radioattivi, hanno, come in parte si è visto, proprietà fisiche e chimiche che le differenzierebbero nettamente, se già non fosse ciascuna di esse caratterizzata dalla natura dei raggi che emette, dal diverso valore della costante di trasformazione o dalla diversa portata dei raggi α. I metodi adoperati per separare l'uranio-X e il torio-X rispettivamente dall'uranio e dal torio, indicano già il diverso loro comportamento chimico. Si potrebbe aggiungere ora, che il torio-A è più volatile del torio-B, che l'attinio-A e l'attinio-B possono separarsi per via elettrolitica, ecc. Per quanto riguarda i prodotti di trasformazione del radio, che sono quelli che maggiormente interessano, si può notare, che la sua emanazione, resa luminosa da scariche elettriche, emette una luce, il cui spettro caratterizza a quanto pare l'emanazione stessa, poichè esso è costituito da righe, alcune delle quali non pos-

sono identificarsi con nessuna di quelle dei corpi conosciuti. Una di queste righe sembra identica ad una che si osserva nello spettro dei lampi (155). L'osservazione dello spettro dell'emanazione deve farsi con rapidità, perchè lo spettro stesso in breve tempo si modifica. Infine, mentre i prodotti radio-A, radio-C, radio-F (polonio o radiotellurio) si valatilizzano a circa 1000°, il radio-B si volatilizza già a 700° ed il radio-E a 1000° non perde ancora lo stato solido.

Ciascuna delle quattro serie di trasformazioni termina con un prodotto radioattivo, il quale si trasforma in una nuova sostanza non sensibilmente radioattiva, che però non è ancora conosciuta. Inoltre v'è luogo a dubitare, che il radio sia esso stesso un prodotto di trasformazione di un corpo diverso. Le ricerche future forniranno forse su questi punti delle nozioni attendibili, ma per ora non si possono mettere avanti che delle congetture verosimili.

Che il radio sia un prodotto di trasformazione, risulta dal valore della sua costante radioattiva, in virtù del quale, se in un'epoca geolo-

gica, anche delle più recenti, fosse esistita nel nostro globo una quantità di radio grande come si vuole, all'epoca attuale non si troverebbe certamente più nessuna traccia di esso. E poichè il radio si trova sempre nei minerali contenenti torio ed uranio, sorge subito l'idea che il radio sia un prodotto di trasformazione di uno di quei due corpi. Dall'esame chimico di un gran numero di minerali, e dalla misura sia della loro radioattività, sia della quantità di emanazione che possono fornire, si è riconosciuto, che la quantità di radio in essi contenuta è sensibilmente proporzionale alla quantità di uranio che entra nella loro composizione (156). Ma v'ha di più. Presa una notevole quantità d'un sale d'uranio privo di radio, dopo un certo tempo si riconobbe che ne conteneva (157); e se, com'è probabile, un simile risultato verrà ottenuto in modo anche più sicuro, cioè in seguito ad esperienze di lunghissima durata, l'intravvista relazione di parentela fra radio ed uranio rimarrà dimostrata.

In ogni caso v'è motivo di credere che il radio, sia bensì un prodotto di trasformazione

dell' uranio, ma non il prodotto immediato. Perciò se della prima e dell' ultima delle serie della precedente tavola si dovrà fare un giorno una serie unica, resteranno da inserirsi fra l' uranio-X ed il radio dei termini non ancora conosciuti. Uno di questi termini intermedi è probabilmente l'attinio, il quale, secondo recentissime esperienze, può generare l' emanazione del radio. Avendo infatti il sig. Boltwood (158) separato da un chilogrammo di carnotite (il quale conteneva 200 gr. di uranio) l' attinio in forma di cloruro, e chiuso questo sale in un recipiente di vetro saldato alla lampada, egli riconobbe, che col tempo esso generava dell' emanazione di radio, in quantità corrispondente alla quantità di radio che sta in equilibrio radioattivo con 200 grammi di uranio.

Il valore ammesso finora pel peso atomico del radio è 225, mentre quello dell' uranio è assai più elevato (238,5); se ciò non fosse sarebbe difficile considerare il primo come un prodotto del secondo, salvo supponendo che più prodotti diversi di trasformazione possano riunirsi per formarne un terzo di peso atomico più

elevato, cosa di cui non si ha finora esempio. Per ragioni analoghe a quelle che valgono per il radio, è assai probabile, che anche il torio sia originato dall' uranio. Fu constatato del resto dal sig. Strutt (159), che i minerali di torio contengono sempre radio ed uranio. Se tutto ciò verrà provato, le sostanze radioattive verranno comprese tutte in un unico albero genealogico.

Quanto al prodotto stabile finale con cui si chiuderebbe la figliolanza del radio, si ha qualche ragione di supporre, che esso sia il piombo; ma se si riconosce anche in questo corpo un certo grado di radioattività, le trasformazioni atomiche verosimilmente continueranno ancora sino a giungere assai probabilmente fino all' argento (160).

Per qualche tempo si è supposto, che il prodotto finale stabile, con cui si chiude la serie del radio, fosse l'elio. È ormai provato che questo gas, che si trova in tutti i minerali contenenti radio, e la cui esistenza venne rivelata dall'analisi spettroscopica nel sole, dal quale anzi se ne dedusse il nome, si produce durante le trasformazioni del radio, giacchè molte esperienze ten-

dono a dimostrare la sua graduale apparizione nei gas contenenti l'emanazione emessa da questo corpo.

I signori Rutherford e Soddy già avevano annunciato la probabilità della produzione dell'elio per parte del radio (161), quando i signori Ramsay e Soddy (162) ne dimostrarono la presenza nel gas contenente emanazione che si svolge da un sale di radio. Colle loro ultime esperienze poterono constatare che, mentre dapprincipio la luce della scarica fatta passare attraverso il gas contenente l'emanazione dava lo spettro di questa, dopo qualche giorno lo spettro era modificato per l' apparizione delle righe caratteristiche dell' elio.

Un' esperienza posteriore, eseguita dai signori Dewar e Curie (163), sembra veramente mettere fuori d' ogni dubbio la produzione dell' elio per parte dell' emanazione del radio.

Circa 4 decigrammi di bromuro di radio puro e secco restò per tre mesi entro un' ampolletta comunicante con un tubo di Geissler, cioè con un tubo munito di due elettrodi saldati attra-

verso il vetro, mediante i quali si può rendere luminoso colle scariche elettriche il gas in esso contenuto. Dapprima si fece un buon vuoto in questi recipienti, e si riconobbe, che dal corpo radioattivo si svolgeva continuamente un gas, in ragione di un centimetro cubo (alla pressione ordinaria) ogni mese. Facendo passare le scariche nel tubo ed esaminando lo spettro della luce in tal modo prodotta, si videro le righe dell' idrogeno e quelle del mercurio, quest' ultimo proveniente dalla pompa con cui si faceva il vuoto. Fin qui non era apparsa dunque nessuna traccia di elio.

Lo stesso bromuro di radio fu poi posto in un tubo di quarzo, e riscaldato sino a fusione del sale, mentre si produceva una aspirazione attraverso un tubo raffreddato nell' aria liquida. Si raccolsero così circa 2,6 centimetri cubi di gas, che era luminoso per l' emanazione che conteneva. Trasportato in un tubo di Geissler, questo gas non mostrò che lo spettro dell' azoto, anche dopo d' avere cercato d' eliminare questo gas per mezzo della condensazione provocata raffreddan-

dolo con idrogeno liquido. A questo punto il tubo di quarzo contenente il sale di radio venne chiuso ermeticamente, mentre vi si faceva il vuoto. Venti giorni più tardi, reso luminoso il gas contenuto nel tubo, mediante elettrodi esterni di stagnola, lo spettroscopio mostrò nettamente l' intero spettro dell' elio.

Esperienze dello stesso genere, alle quali sembra non si possa nulla obbiettare, eseguite dai signori Himstedt e Meyer, diedero lo stesso risultato finale (164).

Contottociò non si può oggi ammettere, che l'elio sia il prodotto ultimo delle successive disaggregazioni atomiche del radio. Infatti alcuni dei prodotti intermedî, e particolarmente il radio-D, si trasforma con tale lentezza, che non si potrebbe comprendere la produzione relativamente rapida di elio per parte dell' emanazione.

Il Rutherford ritiene invece, che le particelle costituenti i raggi α emessi dall' emanazione siano atomi di elio. Per decidere se questa supposizione corrisponda o no al vero, occorre conoscere con precisione sufficiente qual sia la massa delle par-

ticelle α, e cioè se sia veramente quadrupla di quella dell'atomo d'idrogeno, tale essendo la massa d'un atomo di elio. Ora, le determinazioni eseguite sino a non molto tempo fa con metodi simili a quelli di cui si tratterà nel cap. VII, hanno condotto a valori notevolmente più piccoli. Così il sig. Mackenzie (165) ha trovato pel rapporto fra carica e massa delle particelle α il valore 4600; e siccome lo stesso rapporto per l'atomo d'idrogeno è 10000, se ne deduce, che le particelle α hanno una massa eguale a solo due volte e un quinto quella dell'idrogeno.

Però, come fece notare il Rutherford (166), il grado di precisione in misure di tal genere non fu mai tale da poterne trarre conseguenze recise; ragione per cui si resero necessarie nuove esperienze più accurate, che sono state recentemente condotte a termine dal medesimo Rutherford da solo (167), e poi colla collaborazione del sig. Hahn (168). Da queste esperienze risulta in primo luogo, che il rapporto fra la carica e la massa delle particelle resta invariato durante il loro passaggio attraverso la materia pondera-

bile, pur producendosi una graduale diminuzione della loro velocità; in secondo luogo risulta altresì, che il rapporto suddetto ha il medesimo valore, sia che si tratti dei raggi α emessi dal radio-A, dal radio-C, dal polonio (o radio-F), oppure dall'attinio o dal torio; infine si ricava dalle dette esperienze, che quel rapporto per le particelle α ha un valore uguale alla metà del valore relativo all'atomo dell'idrogeno.

Quest'ultimo risultato ha una speciale importanza, perchè le misure, dalle quali esso venne dedotto, erano suscettibili di tale esattezza, che l'errore probabile sul valore numerico finale non poteva certamente superare un cinquantesimo del valore medesimo. Ora, mentre la conclusione più spontanea che se ne può trarre, sarebbe quella di considerare le particelle α come molecole d'idrogeno, ve ne sono altre due non meno plausibili, colle quali diviene possibile render conto della produzione di elio per parte dell'emanazione o dei successivi prodotti di trasformazione del radio. Una consiste nel supporre che le particelle α siano atomi di elio, e abbiano quindi una

massa quadrupla di quella dell' atomo d' idrogeno, ma la loro carica sia doppia di quella spettante ai ioni monovalenti. L' altra ipotesi consiste nell' ammettere, che le particelle abbiano la massa doppia di quella dell' atomo d' idrogeno, e che le particelle stesse, riunendosi per coppie, generino poi gli atomi dell' elio. Tanto l' una che l' altra ipotesi si può sostenere, sia ammettendo che le particelle α vengano espulse colla loro carica, sia ritenendo che questa carica sia da esse acquistata dopo, in seguito agli urti contro le molecole del mezzo nel quale si muovono.

Ammettendo che le particelle α siano atomi di elio, il cui peso atomico è 4, s' incontra una difficoltà nel render conto della produzione del radio per parte dell' uranio, e di quella del piombo per parte del radio, giacchè, assunti i numeri 238,5 come peso atomico dell' uranio, 225 come peso atomico del radio e 206,5 come peso atomico del piombo, subito si scorge, che questi tre numeri non differiscono di un multiplo di 4, mentre ciò si dovrebbe verificare, se realmente con ripetute sottrazioni di un atomo

di elio si dovesse passare dall'atomo di uranio a quelli del radio e del piombo. Però la difficoltà scompare se si assume 226,5 invece di 225 come peso atomico del radio; questo nuovo valore non è inammissibile, giacchè bisogna ricordare, che le prime determinazioni della Signora Curie diedero come risultato 146, mentre successivamente si attribuirono al peso atomico del radio valori di più in più elevati, man mano che si riuscì ad ottenerlo allo stato di purezza maggiore.

Colla supposizione del Rutherford resta naturalmente spiegato come l'elio sia presente nel miscuglio gassoso, che si svolge dalle soluzioni di radio come da quelle di attinio (169). Stante poi l'identità di comportamento dei raggi α emanati dai varî corpi radioattivi è sommamente probabile, che le particelle α siano in tutti i casi atomi di elio.

In ogni modo può considerarsi come un risultato acquisito alla scienza quello della produzione continua d'un elemento chimico ben definito (l'elio) per parte di un'altro (il radio), che intanto lentamente si distrugge.

Una volta che si consideri come dimostrata la continua disaggregazione di atomi nelle sostanze radioattive, rimane da indicare la causa probabile di essa. Secondo il Lodge (170) la principale causa dell'instabilità degli atomi è la continua perdita di energia degli elettroni negativi, moventisi in orbite chiuse. Come si vedrà nell'ultimo Capitolo, ogni elettrone che si muove in tal guisa genera una continuata e periodica perturbazione elettromagnetica, che l'etere propaga colla velocità della luce, e che rappresenta perciò una continua sottrazione d'energia. Così le velocità degli elettroni varieranno lentamente, e per conseguenza anche le loro masse apparenti, che, come si dirà, sono funzione della velocità. Si comprende in tal modo come, in causa del graduale mutamento delle sue condizioni meccaniche, un atomo possa divenire un sistema instabile, che non tarderà a sfasciarsi improvvisamente, lanciando a distanza parte degli elementi che lo costituivano, con nuovo adattamento delle parti restanti in un aggregato stabile, almeno per un certo tempo.

Capitolo VII.

Massa, velocità e carica elettrica dei ioni e degli elettroni.

E giunto il momento di dare qualche idea dei metodi, coi quali si è potuto misurare il rapporto fra la carica elettrica e la massa degli elettroni o dei ioni, come pure i valori separati di queste due quantità, nonchè la velocità colla quale si muovono nei varî casi. Tali metodi sono principalmente basati sopra gli effetti prodotti dal campo elettrico e dal campo magnetico, separatamente od insieme, sulle particelle elettrizzate in movimento, oppure sul calore sviluppato dalle particelle stesse col loro urto contro un ostacolo, o infine sulla proprietà che esse possiedono di servire come nuclei alla condensazione dei vapori. Senza entrare nei dettagli delle esperienze e dei relativi calcoli, esaminiamo questi diversi fenomeni.

Consideriamo dapprima l' effetto che produce un campo magnetico sui raggi catodici, supponendo che un fascio sottile di questi raggi, che va a render luminosa la parete opposta al catodo, abbia direzione perpendicolare a quella della forza magnetica. Per esempio il tubo, entro cui si generano i raggi catodici, sia posto fra i poli di una calamita. Gli elettroni in moto, costituenti i raggi catodici, devieranno dal loro cammino rettilineo, ed i raggi stessi assumeranno la forma di archi di cerchio. Infatti, il campo magnetico produce una forza elettromagnetica applicata all' elettrone in moto, diretta come quella che produrrebbe sopra una corrente elettrica coincidente colla sua traiettoria. Tale forza è dunque perpendicolare in pari tempo e alla traiettoria e alla forza magnetica; essa non influisce sulla velocità dell' elettrone, ma solo sulla direzione del suo movimento, e questo sarà circolare ed uniforme. La forza elettromagnetica sarà allora uguale e contraria alla forza centrifuga del detto moto circolare. Ora la forza centrifuga dipende in modo semplice e conosciuto dalla

massa, dalla velocità e dal raggio della traiettoria; e d'altra parte la forza elettromagnetica è proporzionale alla carica dell'elettrone e alla sua velocità, giacchè il prodotto di questi due fattori sta a rappresentare l'intensità della corrente elettrica equivalente. Si arriva dunque ad una relazione semplice fra le seguenti quantità: 1.° carica e massa dell'elettrone, o, più esattamente, rapporto fra l'una e l'altra; 2.° velocità dell'elettrone; 3.° intensità del campo magnetico; 4.° raggio dell'arco di cerchio percorso (*). Le due ultime si misurano, e basterebbe conoscere una delle altre per essere in grado di calcolare quella rimanente.

Se si suppone, come appunto fu fatto sulle prime, che la velocità dell'elettrone nei raggi catodici sia dell'ordine di grandezza delle velocità

(*) Dicendo e la carica di ogni particella, m la sua massa, V la sua velocità, H l'intensità del campo magnetico, ρ il raggio della traiettoria, la relazione che esiste fra queste quantità è:

$$V = H \rho \frac{e}{m}.$$

molecolari dei gas, si trova per il rapporto fra carica e massa un valore di grandezza simile a quello, che spetta ai ioni dell'elettrolisi. Si sarebbe così indotti a supporre, che la massa degli elettroni sia dell'ordine di grandezza di quelle degli atomi materiali. Per fortuna si comprese presto che la premessa non era esatta, e si cercò di arrivare alla determinazione simultanea delle due prime quantità precedenti ricorrendo, oltre che alla deviazione magnetica dei raggi catodici, ad altri effetti o ad altre considerazioni. Per es. si può ammettere, che la velocità dell'elettrone abbia quel valore, per il quale la sua energia cinetica equivalga al lavoro elettrico relativo a passaggio della carica dell'elettrone dal potenziale del catodo a quello dell'anodo. Un metodo simile è stato adoperato dai signori Kaufmann (171) e Simon (172).

Il signor J. J. Thomson (173) determinò invece la velocità degli elettroni misurando la carica negativa da essi abbandonata entrando, dopo aver subìto la deviazione per opera del campo magnetico, in un conduttore cavo comunicante

con un elettrometro, e misurando in pari tempo l'energia da essi trasportata, per mezzo di una coppia termoelettrica da essi colpita. Alla relazione fra le quantità prima enumerate, se ne aggiungono così due altre (*). Una di esse esprime, che la carica elettrica trasportata al conduttore (e questa è nota dalla misura che se ne fa) è uguale al numero di elettroni moltiplicato per la carica costante di ciascuno; l'altra esprime, che l'energia trasportata e trasformata per urto in calore (e misurata per mezzo della coppia termoelettrica) è uguale al numero di elettroni moltiplicato per l'energia cinetica di ciascuno, la quale non è che la metà del prodotto della massa per il quadrato della velocità.

Alle due incognite, che si avevano prima, se ne è così aggiunta una nuova, che è il numero di elettroni che si sono mossi nella durata del-

(*) Ecco quelle due relazioni:

$$Q = Ne, \; \frac{1}{2} \, mV^2 . N = W ,$$

ove Q è la quantità totale di elettricità trasportata, N il numero di elettroni, W l'energia cinetica dei medesimi.

l' esperienza; ma le relazioni, da una che erano, sono ora tre; per cui, eliminato il suddetto numero di elettroni, resta possibile calcolare tanto il rapporto fra carica e massa di ciascuno, quanto la velocità (*).

Con questo metodo si ebbero i primi risultati attendibili. Per il rapporto fra carica e massa degli elettroni si ottennero numeri pochissimo differenti fra loro cambiando il gas rarefatto in cui si producevano i raggi catodici (aria, idrogeno, anidride carbonica). In ogni caso il valore trovato indicava chiaramente, che se ogni elettrone rappresenta una carica elettrica uguale a quella di un ione elettrolitico, la sua massa è invece di gran lunga minore di quella di un ione di idrogeno. Quanto ai valori trovati per la velocità degli elettroni, questa fu di gran lunga

(*) L' eliminazione di N fra le tre equazioni conduce alle due seguenti:

$$V = \frac{2\,W}{QH\rho}, \quad \frac{e}{m} = \frac{2\,W}{QH^2\rho^2},$$

che servono a calcolare V ed $\frac{e}{m}$.

più grande delle velocità molecolari dei gas, e precisamente intorno ad un decimo della velocità della luce.

Allo stesso Thomson (174) si deve un altro metodo per la determinazione della velocità degli elettroni nei raggi catodici, basato sulla deviazione prodotta da un campo elettrico.

Se i raggi catodici partenti dal catodo *C* (fig. 17), e ridotti ad un sottile fascio dai due

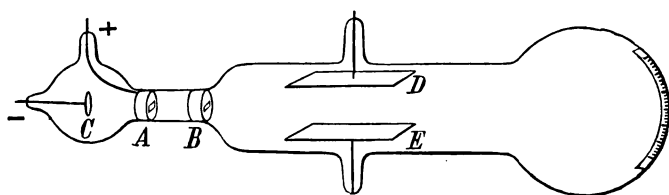



Fig. 17.

grossi diaframmi metallici *A*, *B*, comunicanti col suolo e muniti di strette fenditure orizzontali, passano fra due lastre metalliche *D*, *E*, oppostamente cariche, essi dovranno deviare dal loro cammino rettilineo, giacchè gli elettroni negativi che li costituiscono saranno attratti dalla lastra positiva e respinti dall' altra. Questa deviazione, già preveduta, non era stata ottenuta da

Hertz, e neppure l'ottenne sulle prime il Thomson, in causa della conducibilità, che assume il gas rarefatto attraversato dai raggi catodici, per la quale non è possibile mantenere fra le due lastre una sufficiente differenza di potenziale. Ma basta spingere all' estremo la rarefazione del gas per ottenere l' effetto, e vedere così spostarsi la macchia luminosa dovuta alla fosforescenza eccitata dai raggi catodici sulla parete di fondo del tubo. Se per esempio la lastra E è positiva e la D negativa, la regione illuminata si abbassa, ciò che dimostra che la traettoria degli elettroni si è incurvata all' ingiù.

Effettivamente per effetto della forza elettrica, che si potrà supporre costante fra le due lastre se sono abbastanza grandi e vicine, ogni elettrone descriverà una parabola, e i raggi catodici assumeranno così la forma stessa che presenta, per effetto della gravità, un getto d' acqua uscente da un tubo orizzontale.

Nel caso della gravità la forza è proporzionale alla massa del corpo che si muove, e l'accelerazione è indipendente da essa. Qui invece

la forza che agisce sopra un elettrone, e quindi anche l' accelerazione che essa produce, è proporzionale alla carica elettrica; e siccome a parità di carica, e quindi a parità di forza elettrica, l' accelerazione è in ragione inversa della massa, così può dirsi che l' accelerazione stessa, da cui dipende poi in modo conosciuto la parabola descritta, è proporzionale al rapporto fra la carica e la massa dell' elettrone. Come nel caso della deviazione magnetica, anche in questo della deviazione elettrica si ha una relazione, nella quale entra il solito rapporto e la velocità iniziale dell' elettrone. Se quindi si fanno agire simultaneamente il campo elettrico ed il campo magnetico, le cui linee di forza dovranno supporsi perpendicolari in pari tempo alle linee di forza elettrica ed alla direzione dei raggi, si avrà modo di calcolare tanto il rapporto fra carica e massa di ogni elettrone, quanto la velocità di esso. Si potrà anzi fare in modo, che gli effetti dovuti ai due campi si compensino. Allora dalla misura della deviazione prodotta quando uno solo di essi agisce, e dall' intensità di ciascuno,

si deducono le due quantità cercate (*). Ottenne così il Thomson velocità di quasi un decimo di quella della luce, ed un valore per il rapporto fra carica e massa di un elettrone concordante con quello trovato coll' altro metodo.

Misure analoghe furono fatte dal Sig. H. A. Wilson (175), il quale, adoperando successivamente catodi di diversi metalli, constatò come dalla natura di essi non dipendessero affatto i risultati ottenuti.

Il metodo di Thomson fu quasi nel medesimo tempo messo in opera anche dal Sig. Lenard (176), il quale operò sui raggi portanti il suo nome, cioè sui raggi catodici fatti uscire dal tubo, in cui si producono, attraverso una sottile foglia di alluminio.

(*) Dicendo θ l' angolo compreso fra la direzione nella quale si muove l'elettrone allorchè esce dal campo magnetico e la direzione di moto iniziale, l la lunghezza del tragitto durante il quale l' elettrone è esposto alle cause deviatrici, F l' intensità del campo elettrico, si ha:

$$V = \frac{F}{H}, \quad \frac{e}{m} = \frac{F\theta}{H^2 l}.$$

Lo stesso fisico (177) applicò pure un nuovo metodo, nel quale si fa agire sugli elettroni un campo elettrico parallelo alla direzione del loro moto. A questo scopo i raggi di Lenard, generati dal catodo *C* (fig. 18), escono da un foro *A* chiuso

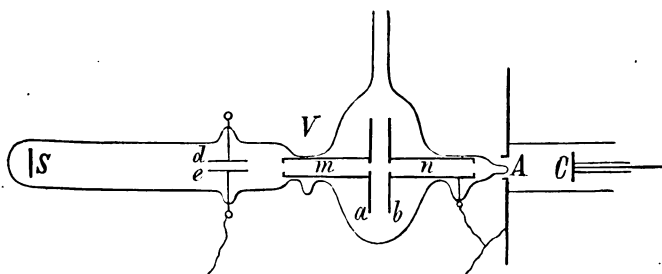



Fig. 18.

da una foglia di alluminio e penetrano nell' apparecchio *V*, contenente un gas estremamente rarefatto. In questo apparecchio trovasi un condensatore formato da due dischi metallici paralleli *a*, *b*, aventi nel centro un piccolo foro, per il quale passano i raggi provenienti da *A* e che si dirigono al diagramma fosforescente *S*. Due tubi metallici *m*, *n*, difendono i raggi dalle azioni elettriche provenienti dal disco *a*, che può essere isolato ed elettrizzato, mentre *b* è sempre in comunicazione col suolo. È quindi solo nel per-

corso fra *a* e *b* che gli elettroni sono esposti ad una forza elettrica, che ne aumenta o ne diminuisce la velocità, secondo che al disco *a* si dà carica positiva o negativa. Gli stessi raggi sono peraltro più innanzi deviati, come nel metodo precedente, da un campo magnetico oppure da un campo elettrico trasversale generato dai dischi paralleli *d*, *e*, e viene misurata la deviazione prodotta.

Come si poteva prevedere, a parità di campo elettrico fra *d* ed *e* la deviazione è diversa secondo il segno della carica di *a*, giacchè da questo dipende la velocità, colla quale gli elettroni arrivano nel campo che li fa deviare. Misurando questa deviazione e l'intensità dei due campi, si può calcolare il solito rapporto; e più oltre verrà dato il valore ottenuto dal Lenard con questo metodo.

Citerò un ultimo metodo ingegnosissimo, ma un poco complicato, messo in pratica dal signor Wiechert (178) per misurare direttamente e con precisione la velocità dei raggi catodici. Aggiungendovi la deviazione magnetica, egli potè cal-

colare anche il rapporto fra carica e massa dell' elettrone.

Ma non è solo sugli elettroni dei raggi catodici, che si eseguirono le misure destinate a determinare le loro costanti caratteristiche; altre furono fatte e sugli elettroni negativi emessi dai metalli colpiti dai raggi ultravioletti, e su quelli emessi dai corpi incandescenti o dai corpi radioattivi.

Così il sig. J. J. Thomson (179) ricorse ad un metodo sperimentale, che gli permetteva di far agire un campo magnetico sopra gli elettroni emessi da un metallo illuminato. Con una disposizione sperimentale quasi identica, chi scrive (180) aveva già constatato per primo, che un campo magnetico rendeva minore il trasporto dell' elettricità negativa dal corpo che riceve i raggi ultravioletti ai corpi vicini; il sig. Thomson interpretò questo fatto colla nuova teoria, e se ne valse nel modo seguente.

Un piccolo disco di zinco *AB* (fig. 19) portato da un' asticella metallica *L* e caricato negativamente trovasi in un recipiente, nel quale l' aria fu

assai rarefatta, e può essere più o meno avvicinato ad una reticella metallica *CD* ad esso parallela e comunicante con un elettrometro. Il recipiente è chiuso da un disco di quarzo *EF*, affinchè le più rifrangibili radiazioni ultraviolette, generate da un flusso di scintille che scoccano tra fili di zinco, non siano assorbite prima che arrivino al disco elettrizzato. Se, dopo aver constatato che l'elettrometro si scarica quando agiscono le radiazioni, anche se il disco *AB* è alquanto lontano dalla reticella, si fa agire un campo magnetico, le cui linee di forza siano parallele al disco e alla reticella, si verifica, che al di là di una certa distanza fra disco e reticella il fenomeno del trasporto di elettricità negativa da *AB* a *AC* cessa quasi completamente.

Fig. 19.

Ecco qual' è il meccanismo cui questo fenomeno è dovuto.

Quando non esiste il campo magnetico gli elettroni negativi, che le radiazioni espellono dal disco di zinco AB (fig. 20), si muovono diret-

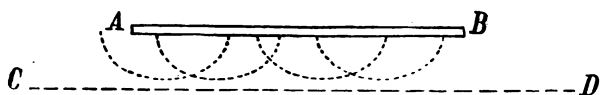



Fig. 20.

tamente da $A\,B$ verso $C\,D$; ma se agisce un campo magnetico perpendicolare al piano della figura, ogni elettrone percorre una curva, che si dimostra essere una cicloide, di modo che, raggiunta una certa distanza dal disco, l' elettrone ritorna sul disco medesimo, senza poter raggiungere la reticella, se questa è troppo lontana (*). Nella figura sono disegnate in linee punteggiate alcune delle traiettorie percorse dagli elettroni.

La massima distanza raggiunta dall' elettrone dipende in una maniera conosciuta dall' intensità

(*) Prendendo l' asse delle x nella direzione perpendicolare al disco ed alla reticella, l' asse delle y perpendi-

del campo elettrico fra disco e reticella, dalla intensità del campo magnetico, e dal rapporto fra carica e massa dell'elettrone. Perciò misurando le due prime quantità, come pure, mediante gli spostamenti del disco di zinco, la distanza massima fra disco e reticella, al di là della quale quest' ultima non riceve più carica sensibile, si ha modo di determinare il predetto rapporto.

colare a quello e alla direzione del campo magnetico, le equazioni del moto sono:

$$m \frac{d^2x}{dt^2} = Fe - He \frac{dy}{dt}, \; m \frac{d^2y}{dt^2} = He \frac{dx}{dt}.$$

Supposti nulli i valori iniziali di $x, y, \frac{dx}{dt}, \frac{dy}{dt}$, la soluzione di queste equazioni dà, ponendo per semplicità

$$a = \frac{Fm}{H^2e}, \; b = H \frac{e}{m}:$$

$$x = a\,(1 - cos\, bt), \; y = a\,(bt - sen\, bt).$$

Il raggio del cerchio generatore della cicloide è a, e quindi la massima distanza dal disco di zinco che può raggiungere un elettrone è:

$$\frac{2Fm}{H^2e}.$$

L'esattezza della determinazione è limitata per due motivi: 1.° gli elettroni non partono tutti con eguale velocità dal disco, per cui la distanza massima da questo, alla quale essi pervengono, non è per tutti la stessa; 2.° oltre agli elettroni generati alla superficie del disco, se ne producono altri nel seno del gas, e quindi a minor distanza dalla reticella.

Un metodo simile fu applicato dallo stesso Thomson (181) agli elettroni emessi da un metallo incandescente.

Il Lenard (182) misurò dal canto suo il solito rapporto ricorrendo all' azione dei raggi ultravioletti sui metalli nel vuoto; infine il sig. Becquerel (183) ed altri determinarono le solite costanti per gli elettroni emessi dai corpi radioattivi. Senza entrare ora nei dettagli di queste ultime determinazioni, e d' altre che diedero analoghi risultati, giova raccogliere in un quadro i principali valori del rapporto fra carica e massa di un elettrone, onde confrontarli fra loro.

Sorgente di elettroni	Sperimentatore	Data	Metodo adoperato	Rapporto fra carica e massa
Raggi catodici	J. J. Thomson	1897	Deviazione elettrica e deviazione magnetica.	$231{,}10^{15}$ (1)
"	"	"	Deviazione magnetica, carica trasportata e calore svolto.	351 "
"	Kaufmann	1897-8	Deviazione magnetica e differenza di potenziale.	558 "
Raggi Lenard	Lenard	1898	Deviazione elettrica e deviazione magnetica.	191,7 "
"	"	"	Deviazione e campo elettrico.	204 "
Raggi catodici	Simon	1899	Deviazione magnetica e differenza di potenziale	559,5 "
"	Wiechert	"	Deviazione magnetica e velocità.	303 " 465 "
Raggi ultravioletti	J. J. Thomson	"	Diminuzione della scarica per azione del campo magn.°	228 "
Metallo rovente	"	"	" "	261 "
Raggi ultravioletti	Lenard	1900	Deviazione magnetica e campo elettrico.	345 "
Raggi β del radio	Becquerel	"	Deviazione elettrica e deviazione magnetica.	circa 300 "

(1) $231{,}10^{15}$ significa quel numero che si scrive aggiungendo 15 zeri alla destra del 231, cioè il numero 231 000 000 000 000 000. L' unità di misura qui adottata per la carica è l' unità elettrostatica, e cioè la quantità di elettricità che respinge una quantità eguale posta ad un centimetro di distanza colla forza uno, cioè una dine.

Se si tien conto della grande varietà dei fenomeni, nei quali si manifestano gli elettroni negativi, e della diversità di metodi adoperati nella misura del rapporto fra la carica e la massa di ciascuno, l'accordo fra i risultati è notevole. Sull'ordine di grandezza di quel rapporto non può rimanere dunque nessun dubbio, giacchè esso risulta da 663 a 1937 volte maggiore dell'analogo rapporto per il ione d'idrogeno nell'elettrolisi, rapporto che è uguale a $0{,}289 . 10^{15}$, ed ancora molto più grande di quello relativo ai ioni d'altri corpi. Le particelle costituenti i raggi catodici, e i raggi β dei corpi radioattivi, non possono dunque essere atomi, ma debbono essere particelle di massa di gran lunga minore. *Ed è così, che nel modo più sicuro e con metodi puramente fisici è stata dimostrata l'esistenza di masse di gran lunga più piccole di quella del più piccolo degli atomi delle sostanze conosciute.*

La differenza tra i valori trovati dai varî sperimentatori per il rapporto fra carica e massa degli elettroni non dipende solo da errori di misura, giacchè esperienze assai precise fatte dal

sig. Kaufmann (184) hanno dimostrato, che quel rapporto varia colla velocità degli elettroni, divenendo rapidamente minore quando quella velocità molto si avvicina alla velocità della luce. Quel fisico fece agire sui raggi β emessi da un sale di radio, un campo magnetico ed un campo elettrico, aventi una stessa direzione perpendicolare a quella dei detti raggi. Questi deviavano per azione della forza magnetica in una certa direzione, e per azione della forza elettrica in una direzione perpendicolare alla precedente; dimodochè questa disposizione sperimentale somiglia a quella ben nota dei due prismi incrociati, nella quale i due prismi imprimono appunto ai raggi luminosi due deviazioni successive ad angolo retto fra di loro. Come in questa esperienza ogni raggio colorato separato dalla luce bianca per opera del primo prisma subisce una nuova deviazione per opera del secondo, e tutte queste deviazioni possono separatamente misurarsi, così nelle esperienze di Kaufmann si possono misurare le deviazioni subite da ciascuno di quei raggi β, che

differiscono gli uni dagli altri per i diversi valori delle velocità degli elettroni che li costituiscono.

Con un tal metodo trovò il Kaufmann certi valori per il rapporto fra carica e massa degli elettroni, abbastanza prossimi a quelli ottenuti dagli altri sperimentatori, finchè si trattava di elettroni dotati di velocità relativamente moderate, ossia di elettroni costituenti raggi β poco penetranti, mentre trovò pei raggi assai penetranti valori più piccoli; anzi il detto rapporto si ridusse circa a metà del consueto valore, per elettroni la cui velocità era circa nove decimi della velocità della luce.

E poichè tutto fa credere, che la carica elettrica sia per tutti gli elettroni sempre la stessa, così bisogna ritenere che la loro massa non sia costante, ma cresca rapidamente colla loro velocità, quando questa si avvicina ad essere eguale alla velocità della luce. Questo risultato ha una grande importanza, poichè esso è conforme alla supposizione, secondo la quale gli elettroni non hanno massa materiale, nel senso ordinario della

parola, ma solo una massa apparente dovuta alla loro natura di cariche elettriche in movimento.

Misure simili a quelle istituite sugli elettroni negativi furono fatte dal sig. Wien (185) e dal Thomson (186) su ioni positivi, costituenti i raggi-canali. Il primo ottenne come risultato una velocità di 3600 chilometri, ed il valore $0,009 . 10^{15}$ per il solito rapporto. E così è indubitato, che le particelle positive dei raggi-canali non sono elettroni, ma atomi e forse grossi gruppi atomici elettrizzati.

La precedente conclusione relativa alla piccola massa degli elettroni è basata sull' ipotesi, che la carica elettrica dei ioni nei gas sia eguale a quella che è annessa ad ogni ione (o meglio ad ogni valenza di un ione) nell' elettrolisi. Ora questa, più che ipotesi, può dirsi oramai cosa provata. Infatti, lo studio della diffusione dei ioni nei gas (187) ha condotto a questa conclusione importante, che la carica elettrica di ogni ione è sensibilmente uguale a quella che hanno i ioni nella elettrolisi. Ma prima ancora che si giungesse a questo risultato, la carica di ogni ione in un gas era stata direttamente misurata dal

sig. Thomson (188) con un metodo veramente geniale, di cui cercheremo di dar qui un' idea.

Quando dell' aria satura di vapor d' acqua bruscamente si espande, una parte del vapore in essa contenuto si condensa in nebbia, in causa del raffreddamento che accompagna l' espansione, ed ogni gocciolina ha generalmente come nucleo una particella di quel pulviscolo, che d' ordinario l' atmosfera contiene. Sembra infatti, che la condensazione del vapore richieda la presenza di corpi piccolissimi, e che essa cominci a prodursi appunto sulla loro superficie, il cui raggio di curvatura è certamente assai piccolo; per lo meno la presenza di quei corpuscoli anticipa e favorisce la liquefazione del vapore. Se infatti il pulviscolo viene con gran cura eliminato, perchè la nebbia si formi occorre un' espansione dell' aria umida alquanto maggiore di quella, che prima bastava.

Orbene, il sig. C. T. R. Wilson dimostrò (189), che un gas contenente ioni si comporta come l' aria carica di pulviscolo, poichè i ioni medesimi funzionano come nuclei o centri di condensazione del vapore. Ed invero un' espansione del-

l' aria, che sia troppo piccola perchè la nebbia si produca, può essere invece sufficiente a far precipitare il vapore, quando l' aria stessa sia ionizzata, per esempio col farla attraversare dai raggi di Röntgen.

Che il mutato comportamento del gas si debba proprio alla presenza di ioni, viene confermato dal fatto che, eliminando i ioni col far passare nel gas la corrente elettrica, la formazione della nebbia rimane nuovamente ritardata, ossia richiede di nuovo una maggiore espansione.

L' apparecchio adoperato dal Thomson è alquanto complicato; ma sua parte èssenziale è un recipiente, che contiene aria umida, ed in cui si trovano due conduttori orizzontali l' uno sull' altro. Il superiore, che può servire di chiusura al recipiente, è generalmente costituito da un disco di sottile alluminio, ed è tenuto in comunicazione col suolo; l' inferiore, il quale può essere costituito dalla massa d' acqua, che mantiene satura d' umidità l' aria sovrastante, è in comunicazione con un elettrometro. Al momento opportuno si deve ionizzare l' aria, il che si ottiene facendo entrare nel recipiente attraverso la lamina

d' alluminio, sia raggi X, sia i raggi emessi da un corpo radioattivo.

Si potranno anche introdurre nel recipiente dei ioni dando al conduttore inferiore una carica negativa, e facendo cadere sulla sua superficie dei raggi ultravioletti. In tal caso il disco di alluminio è sostituito da una reticella metallica, il recipiente è chiuso da una lastra di quarzo, e come conduttore inferiore s' impiega un disco metallico, per esempio di zinco.

In una prima fase dell' esperienza si misura la quantità di elettricità, che passa nell' unità di tempo da un conduttore all' altro, ossia l' intensità della corrente che attraversa l' aria ionizzata. Essa si trova moltiplicando la diminuzione di potenziale nell' unità di tempo, dedotta dalla diminuzione della deviazione elettrometrica, per la capacità del sistema formato dal conduttore inferiore insieme all' elettrometro. Ma d' altra parte quella corrente è dovuta al movimento dei ioni sotto l' azione del campo elettrico esistente fra i due dischi, e, supposto noto questo campo, come pure il numero di ioni esistenti nell' unità

di volume, la carica di ciascuno e la velocità con cui si trasportano da un disco all' altro, quella intensità di corrente si potrebbe calcolare in base a questi elementi. Eguagliando i due valori si avrà un' equazione contenente, oltre i dati numerici risultanti direttamente dalle misure, il numero di ioni, la carica e la velocità di essi (*). Ma la velocità dei ioni in un campo elettrico di nota intensità è stata misurata e si conosce; per

(*) Dicendo E l'intensità del campo fra i due dischi, N il numero di ioni per centimetro cubo, V la velocità dei ioni in un campo d'intensità uno, e la carica di ognuno, A la superficie dei dischi, si ha evidentemente l'espressione

$$N\ V\ E\ e\ A$$

per l'intensità della corrente da un disco all'altro; e se C è la capacità del disco isolato, P la diminuzione del suo potenziale nell'unità di tempo, l'equazione di cui si parla nel testo è

$$N\ V\ E\ e\ A = C\ P$$

Misurando E, A, C, P e assumendo per V il valore dato dalle esperienze speciali, che furono fatte dal Rutherford per determinare questa velocità (480 c. nel caso di ioni prodotti nell'aria dai raggi X), non rimangono incogniti che N ed e. Il numero N viene misurato nel modo descritto più avanti nel testo.

cui, onde giungere alla determinazione della carica dei ioni, non resta più che misurare il numero di essi nell' unità del volume.

A raggiungere questo intento vale la seconda parte dell' esperienza. Se con una conveniente espansione dell'aria si determina la produzione della nebbia, basterà contare in qualche modo le goccioline d' acqua che la formano, perchè lo scopo sia raggiunto. Infatti, ammesso che ognuno dei ioni sia nucleo di uno di quelle goccioline, il numero di queste sarà eguale al numero di quelli. Orbene, per valutare il numero delle goccioline basta dividere la massa totale di esse per la massa di ciascuna. La massa totale si calcola in base alla misura della temperatura minima raggiunta dall' aria nell'atto dell' espansione e della temperatura dell' aria stessa dopo la formazione della nebbia (*); la massa di ogni

(*) Dicendo t, t' quelle due temperature, C il calor specifico dell' aria a volume costante, L il calore latente di evaporazione dell' acqua, M la massa dell' aria per unità di volume e q la massa di vapore condensato in un centimetro cubo di aria, si ha

$$L\, q = C\, M\, (t' - t).$$

gocciolina si desume dal suo diametro, e questo dalla velocità con cui essa cade, ossia dalla velocità con cui si abbassa il limite superiore, sempre abbastanza nettamente visibile, della nube formatasi.

Ed è naturale che esista una relazione fra le dimensioni di una sfera e la velocità con cui essa cade. Infatti tutti i corpi cadono bensì nel vuoto con eguale velocità, ma non così nell' aria, la cui resistenza rallenta più o meno il loro movimento. Nel caso di una sfera questo rallentamento è tanto più grande, quanto più essa è piccola; per la ragione che, mentre il peso è proporzionale al volume e quindi al cubo del diametro della sfera, la resistenza opposta dall'aria è proporzionale invece alla sua superficie, e quindi al quadrato del suo diametro. Perciò al diminuire di questo il peso diminuisce assai più rapidamente della resistenza dell' aria. Questa è anzi la nota ragione per la quale i corpi ridotti a piccoli frammenti, come le polveri minute e le piccole goccie, cadono lentamente al punto da sembrare spesso come immobili.

Per la determinazione del diametro delle goccioline d' acqua vale una formola (*), che lega fra loro il diametro stesso, la velocità di caduta, e la viscosità del mezzo in cui si muovono. Conosciuto quel diametro si calcola subito nel modo descritto il numero dei ioni, ed infine la carica di ciascuno.

Il risultato finale, a cui pervenne Thomson in una serie di esperienze fatte sull'aria ionizzata dai raggi X, fu, che la carica di ogni ione è (in unità elettrostatiche) $6,5 . 10^{-10}$ ossia 0,000 000 000 65. Da altre esperienze, eseguite ricorrendo all'azione dei raggi ultravioletti sullo zinco dedusse il valore assai poco differente $6,8 . 10^{-10}$.

Più tardi però lo stesso Thomson (190) riconobbe, che quei risultati dovevano essere corretti. Si è constatato che i ioni negativi richiedono, perchè il vapore si condensi intorno ad essi,

(*) Se V è la velocità di caduta di una gocciolina, r il suo raggio, μ il coefficiente di viscosità dell'aria e g l'accelerazione della gravità, si ha la formola

$$9 \mu V = 2 g r^2.$$

Per l'aria $\mu = 0,00018$.

un' espansione minore di quella minima necessaria per i ioni positivi, e che probabilmente nelle descritte esperienze pochi di questi ultimi entravano in azione. Si sa ora infatti, che, aumentando bruscamente il volume dell' aria umida nel rapporto di 1 a 1,25, i ioni negativi e non quelli positivi funzionano come nuclei nella formazione delle goccioline d'acqua, ed è solo quando l'espansione avviene nel rapporto di 1 a 1.31, che anche i ioni positivi cominciano a prender parte al fenomeno.

Le nuove esperienze, nelle quali si tenne conto di ciò, condussero al risultato più preciso di $3,4 \cdot 10^{-10}$ unità elettrostatiche, come carica di ogni singolo ione.

Poco dopo nuove ricerche sullo stesso argomento furono istituite dal sig. H. A. Wilson (191) con un metodo un poco differente, ma che ha il pregio di non rendere necessaria la valutazione del numero di ioni esistenti nell' aria attraversata dai raggi Röntgen.

Anche in questo caso con una brusca espansione nell' aria si fa condensare il vapor d' acqua

in goccioline, che hanno come nucleo un ione; ma la nebbia si produce fra due dischi metallici paralleli. Quando questi siano oppostamente elettrizzati, la velocità, con cui cadono le goccie, è, a seconda della direzione della forza elettrica, diminuita od aumentata rispetto a quella che posseggono, quando non esiste fra i dischi il campo elettrico. Misurando queste velocità di caduta, si ha quanto basta per calcolare la carica di ogni goccia (*).

(*) Dicendo v_1, v_2 le velocità di discesa delle goccioline rispettivamente quando non esiste il campo elettrico, e quando questo esiste ed accelera la caduta; dicendo X l'intensità del detto campo, e la carica di un ione, m la massa di una gocciolina, g l'accelerazione dovuta alla gravità, si ha evidentemente

$$m\,g\,v_2 = (m\,g + X\,e)\,v_1\,;$$

ma, dalla

$$9\,\mu\,V = 2\,g\,r^2$$

della nota precedente, si ricava:

$$m = 3{,}14,\ 10^{-9},\ v_1^{3/2},$$

per cui eliminando m si ha:

$$e = 3.14\ 10^{-9}.\ \frac{g}{X}\,(v_2 - v_1)\sqrt{v_1}\,,$$

che serve a calcolare e in base alle misure di X, v_1, v_2.

Senza entrare in maggiori dettagli relativamente a queste esperienze ingegnose farò rilevare, che esse confermarono una circostanza notata già dal Thomson, e cioè che, se l'intensità dei raggi X adoperati per ionizzare l'aria è assai forte, più ioni invece di uno solo possono formare insieme il nucleo di una stessa goccia. In questo caso la carica della goccia risulta o doppia, o tripla, etc. di quella di una goccia, che abbia per nucleo un ione soltanto. E che ciò realmente possa accadere l'esperienza del Wilson dimostra, giacchè la nebbia appena formatasi si separa in più strati orizzontali, che discendono con velocità differenti. Evidentemente uno degli strati è formato di goccioline aventi per nucleo un semplice ione, un altro strato da quelle aventi un nucleo formato da due ioni, e così di seguito.

È chiaro che, tenuto conto di ciò, la misura delle velocità di discesa di uno qualunque di quei vari strati potrà essere utilizzata per il calcolo della quantità cercata.

Il risultato ottenuto da Wilson è espresso dal numero $3,1.10^{-10}$, assai poco differente da

quello del Thomson. Questo valore coincide sensibilmente con quello, che si trova calcolando la carica del ione idrogeno nell' elettrolisi, se come massa del medesimo si adotta il valore che fornisce la teoria dei gas.

Come si vede, le coincidenze numeriche, che la teoria fa prevedere, risultano verificate entro quei limiti di precisione, che in questo genere di ricerche si può ragionevolmente esigere.

Capitolo VIII.

Gli elettroni e la costituzione della materia.

La teoria degli elettroni, per la facilità colla quale si presta a darci un modello del meccanismo dei fenomeni fisici, ha una incontestabile utilità anche agli occhi di chi è disposto a non vedere in essa che uno strumento di ricerca. In realtà la teoria stessa è appena al suo inizio, e potrà sembrare prematuro il considerarla fin d'ora come la base sicura di un nuovo sistema di filosofia naturale. Tuttavia, poichè anche sotto questo aspetto essa va acquistando importanza, sarà utile dedicare questo ultimo Capitolo ad una succinta esposizione dell'ipotesi, secondo la quale la materia vien considerata come costituita da elettroni.

In questo nuovo modo di concepire la costituzione dei corpi si assegna dunque agli elettroni una parte di fondamentale importanza.

In primo luogo, non avendosi nessuna sicura prova dell' esistenza degli elettroni positivi, vi ha chi suppone, che vi siano soltanto elettroni negativi, e che tutto ciò che insieme a questi costituisce un atomo sia un' unica entità elettricamente positiva, di dimensioni assai grandi relativamente a quelle degli elettroni, i quali si muoverebbero entro di essa liberamente. Supposta sferica ed omogenea la parte positiva dell' atomo, ogni elettrone sarebbe esposto ad una forza attrattiva diretta verso il centro della sfera, e compirebbe intorno a questo centro delle vibrazioni aventi i caratteri delle vibrazioni luminose. Ma generalmente i fisici riconoscono la necessità di ammettere l' esistenza di due specie di elettroni, in certo modo fra loro antagoniste, cioè elettroni negativi ed elettroni positivi, pur ritenendo, che i primi e non questi ultimi possano esistere liberi.

Un atomo neutro sarà allora un sistema costituito da un certo numero di elettroni negativi e

da un egual numero di elettroni positivi, mentre i ioni saranno sistemi costituiti da elettroni delle due specie in numero non eguale. Onde render conto di certi fenomeni, e particolarmente di quelli descritti nel Capitolo II, si è poi condotti a supporre, che alcuni elettroni negativi siano affatto isolati e si muovano sotto l'azione delle forze elettriche provenienti dagli altri elettroni, i quali formerebbero uno o più gruppi relativamente immobili ed elettricamente positivi.

Si addotti l'una o l'altra di queste ipotesi, o una differente che coll'andar del tempo in seguito all'accumularsi di nuovi cognizioni appaia preferibile, bisognerà sempre supporre dotati gli elettroni di certe proprietà essenziali. Così per esempio sarà necessario ammettere, che la separazione di un elettrone negativo avvenga più facilmente, ossia con minor dispendio di energia, da certi atomi, come quelli dei metalli, che da altri. Tuttavia la proprietà fondamentale da attribuirsi agli elettroni consiste nella loro essenza stessa di cariche elettriche, agenti fra loro nel modo espresso dalle formole di Hertz o di Maxwell;

donde risulta che la nuova teoria non pretende affatto di dare ragione della causa prima dei fenomeni elettrici, la quale rimane sempre misteriosa. Anzi si può dire che, mentre per l'addietro si prendeva come punto di partenza l'esistenza dell'etere cosmico, e quella della materia ponderabile caratterizzata dal suo principale attributo, l'inerzia, e si cercava di dare una spiegazione meccanica di tutti i fenomeni, oggi partendo dell'etere e dagli elettroni si costituisce, per così dire, con essi la materia ponderabile, e si cerca di render conto dei fenomeni da essa presentati. La teoria degli elettroni è quindi una teoria della materia piuttosto che una teoria della elettricità; anzi nel nuovo sistema l'elettricità è collocata al posto della materia, la cui essenza del resto non era molto meglio conosciuta, di quel che sia oggi l'essenza degli elettroni.

Per meglio comprendere la portata dell'ipotesi e gli attributi fondamentali degli elettroni, è utile considerare sinteticamente i fenomeni dovuti ai corpi elettrizzati fissi o in moto. Si sup-

ponga adunque, seguendo un ragionamento del Lodge (192), di avere due corpi di differente natura, di metterli a contatto e poi allontanarli. Essi presentano tosto quel complesso di proprietà, che costituiscono i due opposti stati elettrici, ed in particolare essi si attraggono e creano intorno ad essi il campo elettrico. Se uno dei due corpi, per esempio quello che ha lo stato elettrico positivo, viene allontanato indefinitamente, non resta a prendere in considerazione che il corpo negativo. Se lo supponiamo piccolissimo, il campo elettrico sarà rappresentato da linee di forza rettilinee giungenti sul corpo da tutte le direzioni. L'etere circostante è ora deformato, dando a questa parola il più ampio significato, cioè si trova in una condizione forzata, che si manifesta con tensioni lungo le linee di forza, causa delle apparenti forze a distanza, e con pressioni trasversali. Quale sia la causa di questo speciale stato dell'etere, come questo stato sia suscettibile di un doppio aspetto, e cioè possa corrispondere alla carica positiva e alla negativa, è ciò che assolutamente s'ignora, come

tuttora s' ignora la stessa struttura e la stessa natura dell' ente, che esiste ovunque e chiamasi etere.

Si supponga ora, che il piccolo corpo elettrizzato negativamente si muova di moto rettilineo ed uniforme, e cioè si supponga che cambi di posto nell'etere lo stato speciale di deformazione testè definito. Dai fatti sperimentali conosciuti si desume, che questo propagarsi da luogo a luogo della deformazione eterea produce il campo magnetico. Questo può poi considerarsi a sua volta come dovuto ad una deformazione di diversa natura, ma analoga a quella elettrica, in quanto che anche nel campo magnetico esistono tensioni lungo le linee di forza e pressioni nelle direzioni trasversali. Le linee di forza magnetica sono cerchi con centro sulla traiettoria e giacenti in piani a questa perpendicolari.

Una serie di corpi elettrizzati, che si seguano su una stessa traiettoria, ha le proprietà di una corrente elettrica. Perciò la corrente costante può considerarsi come un flusso di elettroni equidistanti in moto uniforme, ed una corrente varia-

bile come un flusso di elettroni in moto vario, o che non si seguono ad intervalli eguali.

Se appunto il piccolo corpo elettrizzato si muove di moto vario, il campo magnetico da esso creato è variabile, e prendono origine i fenomeni d' induzione, come pure i fenomeni luminosi, qualora il moto sia periodico. Ogni variazione di velocità del corpo elettrizzato genera una variazione nel campo magnetico, questa produce una variazione del campo elettrico, e queste variazioni si comunicano da luogo a luogo colla velocità della luce.

Immaginiamo ora che si voglia aumentare ad un dato momento la velocità del corpo elettrizzato, supposto che fino a quell' istante si sia mosso con moto uniforme. In virtù delle note relazioni esistenti fra la forza elettrica e la forza magnetica in un campo elettromagnetico, non è possibile accelerare il moto del corpo elettrizzato senza impiegare energia. Infatti, ad un aumento di velocità consegue una variazione del campo magnetico, che alla sua volta fa nascere una forza elettrica tendente ad opporsi all' accelerarsi

del movimento. Del pari una diminuzione di velocità è contrastata dal sorgere di una forza elettrica, che tende a far conservare al corpo elettrizzato tutta la velocità che possiede. In ogni caso il fenomeno elettromagnetico è dunque tale da simulare l' inerzia, ed il corpo in moto, per il fatto di essere elettrizzato, si comporta come se la sua massa fosse maggiore di quella che realmente possiede.

Quanto si è detto del piccolo corpo elettrizzato vale per un elettrone, e la massa di questo, che abbiamo già detto essere mille e più volte minore di quella d' un atomo di idrogeno, è almeno in parte apparente e non reale (*).

(*) Se il piccolo corpo elettrizzato in moto è una sfera di raggio ρ e carica e, e se si rappresenta con V la velocità della luce, si trova per la sua massa apparente m, quando la sua velocità è piccola in confronto di V, la seguente espressione:

$$m = \frac{2\, e^2}{3\, \rho\, V^2}.$$

Se si assume $e = 3,1 \cdot 10^{-10}$ (valore trovato dal Wilson per la carica d' un elettrone), ed $\frac{e}{m} = 559,5 \cdot 10^{15}$

Questa specie di apparente inerzia, che mostra un corpo elettrizzato oppure un elettrone, rappresenta quel medesimo fenomeno, che nel caso delle correnti elettriche dicesi fenomeno di autoinduzione. Infatti, se invece di un solo elettrone in moto se ne ha un gran numero, e tali elettroni si seguono a piccoli ed uguali intervalli lungo la stessa traiettoria, essi rappresentano una corrente elettrica. L'aumento o la diminuzione di velocità degli elettroni dà luogo ad un aumento o diminuzione nel numero di essi, che nell'unità di tempo passa per un punto dato dalla traiet-

(valore del rapporto fra carica e massa trovato da Simon per gli elettroni nei raggi catodici), si trova:

$$m = 55 \cdot 10^{-29}, \qquad \rho = 13 \cdot 10^{-14}.$$

Se dunque un elettrone fosse una sfera, quando la sua velocità sia piccola, la sua massa apparente sarebbe di

grammi 0,000.... 55

con ventisette zeri fra la virgola e la cifra significativa 5, mentre il suo raggio sarebbe di

centimetri 0,000.... 13

con dodici zeri fra la virgola e la cifra 1.

toria, e quindi corrisponde ad aumento o diminuzione d'intensità della corrente. Ora, quanto si è detto intorno all'effetto di una variazione di velocità per un unico corpo elettrizzato in moto, o per un solo elettrone, è sostanzialmente vero anche per elettroni in numero qualunque, cosicchè ogni variazione di velocità di essi fa sorgere una forza che tende ad impedirla. Dunque ogni variazione d'intensità della corrente fa sorgere una forza elettromotrice, che tende ad opporsi alla variazione stessa, ossia che produce una nuova corrente di tal direzione da attenuare quella variazione. Come si vede, questa corrente è l'estracorrente e quella forza elettromotrice è la forza elettromotrice di autoinduzione.

Riassumendo si potrà dire, che gli elettroni determinano la produzione dei fenomeni detti elettrostatici, quando siano immobili, dei fenomeni magnetostatici e delle correnti costanti, quando costituiscono un flusso uniforme, e dei fenomeni elettromagnetici o ottici, quando si muovono non uniformemente o con moto periodico.

Una brusca variazione di velocità di un elet-

trone, che può essere dovuta per esempio ad un urto, fa nascere un'onda elettromagnetica nell'etere analoga alle onde aeree di esplosione. I raggi X, la cui velocità di propagazione è uguale a quella della luce (193), sono la manifestazione di queste onde.

Siamo ora in grado di comprendere meglio in che consista la moderna ipotesi, secondo la quale la materia è costituita da elettroni. Prima di tutto si potrà ammettere, che gli elettroni non siano materia nel senso usuale della parola, cioè che essi non posseggano altra massa, che quella dovuta al loro movimento ed alla loro natura di cariche elettriche. Le esperienze del sig. Kaufmann, citate nel precedente capitolo, forniscono un valido appoggio a questa ipotesi, avendo egli trovato infatti, che il rapporto fra la carica degli elettroni in movimento e la loro massa cresce rapidamente, allorchè la loro velocità si avvicina assai a quella della luce (*). E siccome l'ipotesi

(*) Per esempio, la massa apparente di un elettrone, animato da una velocità eguale ai $^9/_{10}$ della velocità della luce, risultò quasi doppia della massa di un elettrone dei raggi catodici, avente una velocità eguale ai $^7/_{30}$ di quella della luce.

che varî la carica sarebbe troppo inverosimile, non resta che supporre un rapido aumento della massa.

Poichè dunque gli elettroni, considerati come semplici cariche elettriche e privi di materia, ossia considerati come costituiti da una modificazione dell' etere simmetricamente distribuita intorno ad un punto, simulano perfettamente, in virtù delle leggi del campo elettromagnetico, l'inerzia, mostrando così la proprietà fondamentale della materia, nulla vieta di supporre quest' ultima, e quindi tutti i corpi conosciuti, come aggregazioni o sistemi di elettroni.

Il modo nel quale i vari corpi si comportano di fronte ai raggi catodici, cioè agli elettroni liberi in movimento traslatorio, è tale da testimoniare in favore di questo concetto. Si è infatti riconosciuto, che un corpo arresta gli elettroni, ossia assorbe i raggi catodici, press' a poco in ragione della sua densità, cioè in ragione del numero complessivo di elettroni che lo costituiscono, indipendentemente dal modo nel quale

essi sono raggruppati per formare atomi chimici di diverse specie.

È sommamente probabile, che nuove scoperte sperimentali forniscano in un non lontano avvenire nuove indicazioni intorno al modo nel quale devono supporsi raggruppati gli elettroni per formare gli atomi ponderabili, quantunque tali gruppi siano probabilmente assai complicati, stante l'ingente numero di elettroni che concorrono a formarli. Il meno complesso degli atomi, quello cioè dell'idrogeno, è costituito, come fu detto, da più che mille elettroni, mentre gli atomi delle altre sostanze ne contengono un numero assai maggiore. Si è dunque di fronte ad un problema, che certamente è ponderoso, ma la cui soluzione, almeno parziale, potrebbe non essere impossibile.

Nello stato attuale della scienza, esso non può essere direttamente affrontato, cosicchè bisognerà forse per molto tempo ancora contentarsi di procedere per tentativi, e cioè imaginare varie particolari disposizioni di elettroni dotati di particolari movimenti, onde dare poi la preferenza

a quella che meglio delle altre è capace di render conto dei fenomeni conosciuti.

Per le ragioni più volte esposte nelle precedenti pagine, nello studiare la costituzione di un atomo sarà necessario tener conto, oltre che delle forze elettriche agenti su ciascun elettrone, anche del movimento che eventualmente possiede.

Ma anche elettroni immobili possono assumere certe disposizioni d'equilibrio sotto l'azione delle loro forze reciproche; e quantunque aggregati simili non possano considerarsi come modelli di atomi, è utile tuttavia prenderli dapprima in considerazione, salvo ad esaminar dopo quali modificazioni possano verificarsi in causa di movimenti speciali di un certo numero dei loro elementi costitutivi.

A dare idea di tali strutture stabili di elettroni immobili possono utilmente servire certe antiche esperienze fatte dal Signor Mayer per mezzo di aghi calamitati mobili (194), alle quali non si diede forse la dovuta importanza all'epoca della loro pubblicazione. Ciò che mostra una volta ancora, come non debbano sdegnarsi

mai o considerarsi come troppo banali dei fatti ben accertati o delle esperienze ben condotte, quand' anche sul momento gli uni o le altre non sembrino offrire che un limitato interesse.

Ecco in breve in che consistano le esperienze del Mayer.

Un certo numero di piccole calamite, costituite da tanti identici aghi da cucire, sono infitte in altrettanti dischetti di sughero e messe a galleggiare verticalmente nell' acqua di un apposito recipiente, in modo che tutte le crune degli aghi, costituenti poli magnetici omonimi, si trovino fuori dell' acqua in un medesimo piano orizzontale. Una sbarra magnetica verticale è poi fissata ad una certa altezza al disopra del recipiente, e presenta in basso il polo magnetico di nome contrario a quello delle estremità superiori delle calamite galleggianti. In tali condizioni ognuna di queste si trova esposta alla ripulsione magnetica delle sue compagne e ad un' attrazione proveniente dalla sbarra. E siccome i poli superiori degli aghi possono praticamente considerarsi come vincolati a restare in

un piano orizzontale, così la detta forza attrattiva può considerarsi ridotta alla sua sola componente orizzontale. In altre parole, mentre gli aghi reciprocamente si respingono, essi subiscono poi un' attrazione verso un certo punto. Date a caso delle posizioni qualunque alle calamite galleggianti, esse si sposteranno sinchè non risultino disposte in modo, che la risultante delle forze agenti su una qualunque di esse sia nulla.

La fig. 21 mostra ad un quarto circa del vero alcune delle configurazioni assunte dalle calamite, quando il loro numero variò da 2 a 18, quali vennero direttamente rilevate dal Mayer posando su di esse un cartoncino, dopo avere intinto le crune degli aghi con inchiostro da stampa.

Le piccole mancanze di simmetria in certe configurazioni, come quelle di 8 o di 15 aghi, sono verosimilmente dovute al non possedere rigorosamente gli aghi del Mayer un egual grado di calamitazione.

Come si vede, con 5, con 6, con 8 e con 18 calamite galleggianti è possibile ottenere più di

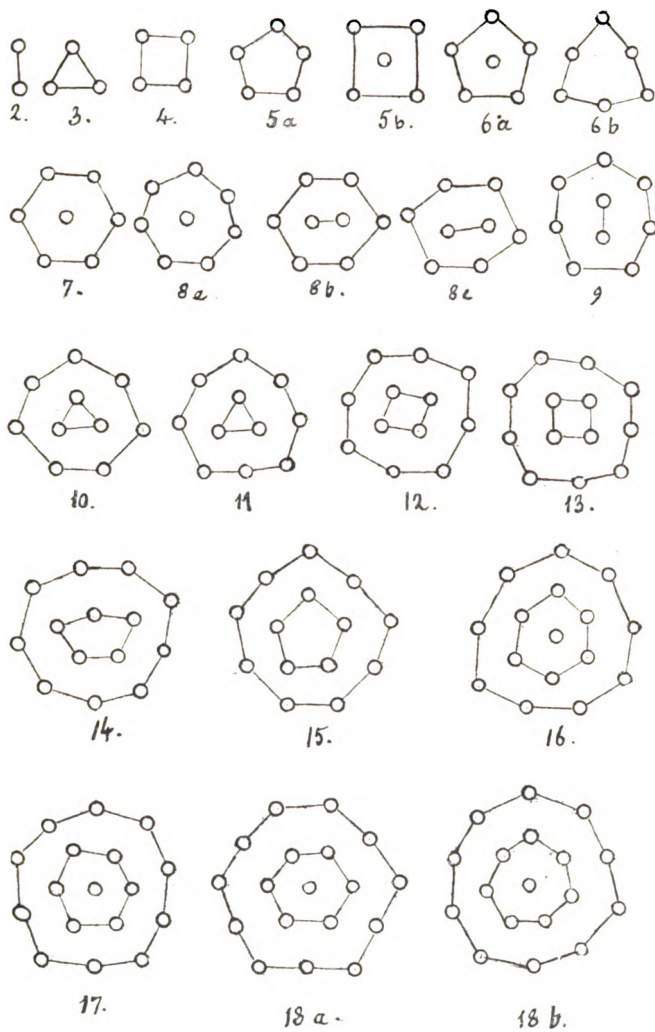



Fig. 21.

una configurazione; ma generalmente queste non hanno uguale stabilità, tanto che, ottenuta per esempio la configurazione 5 *b*, basta dare qualche scossa all'apparecchio perchè essa spontaneamente si trasformi nella 5 *a*.

Si vede altresì che, a partire dal caso di 5 calamite, si formano delle configurazioni che possono chiamarsi di secondo ordine, nelle quali una o più calamite si dispongono nel mezzo, mentre le altre formano intorno ad esse un poligono. Del pari, cominciando dal caso di 16 calamite, si formano sistemi di terzo ordine, mentre, con un numero anche maggiore di calamite, si formano poi sistemi di quarto ordine, quinto, ecc.

Nelle sue esperienze Mayer trovò delle analogie con noti fenomeni fisici, supponendo che le calamite rappresentassero gli atomi costituenti una molecola. Così la possibilità di diverse configurazioni con un medesimo numero di calamite, stava a rappresentare i diversi stati allotropici d'un medesimo corpo.

Nelle esperienze di Mayer, oltre alle forze applicate ai poli esterni degli aghi, intervengono

a rigore quelle che subiscono o che esercitano i poli inferiori; ma, ammettendo che gli aghi stessi non siano troppo corti, il loro effetto può essere per semplicità trascurato, salvo le ripulsioni reciproche fra i poli inferiori, che si sommano a quelle che esistono fra i poli esterni all'acqua. Perciò si può dire, che le forze di ripulsione reciproca seguono la legge dell' inversa del quadrato delle distanze, mentre la forza, che tende a portare ciascuno degli aghi sin sotto la calamita fissa, segue solo approssimativamente la medesima legge, giacchè essa si riduce alla componente orizzontale dell' attrazione dovuta alla sbarra sovrapposta.

Se l' attrazione centrale seguisse una legge differente, si otterrebbero verosimilmente configurazioni diverse da quelle descritte. Il Signor Porter (195) lo ha recentemente verificato ripetendo le esperienze di Mayer con certe varianti, che consistono nel sopprimere la sbarra calamitata fissa e nel colmare d' acqua il recipiente sino all' orlo, anzi sinchè la superfice del liquido assuma tutt' intorno la forma convessa. Sono le

forze capillari che spingono in tal caso tutti i galleggianti verso il centro del recipiente.

Possiamo ora imaginare che le calamite mobili rappresentino altrettanti elettroni negativi, e che la forza che tende a condurle verso un centro sia sostituita dalla forza attrattiva d' una carica positiva, e si avrà l' imagine di un atomo. Conservando poi l' ipotesi, secondo la quale l' atomo stesso risulta da un aggregato di elettroni delle due specie, la detta carica positiva sarà costituita da un sistema di elettroni negativi e positivi con prevalenza di tanti elettroni positivi, quanti sono i negativi che formano la configurazione descritta.

Ma, come si è già avvertito, perchè il modello di atomo così ottenuto soddisfi alle condizioni richieste, converrà imaginare, che gli elettroni negativi isolati siano animati da rapidi moti di rivoluzione, simili a quelli che si riscontrano in un sistema solare. Alle forze agenti su ogni elettrone, delle quali si era già tenuto conto, verrà ad aggiungersi così la forza centrifuga dovuta al suo moto curvilineo; ma resteranno

possibili, ad onta di ciò, delle configurazioni giranti, sostanzialmente simili a quelle immobili offerte dalle piccole calamite di Mayer.

Una costituzione atomica di questo genere, e cioè formata da un certo numero di elettroni negativi distribuiti sopra una circonferenza, da essi percorsa di conserva con velocità costante mentre al centro della medesima è collocata la parte positiva dell' atomo, è stata studiata dal fisico giapponese Nagaoka (196), che la fece conoscere nel dicembre del 1903 alla Società fisico-matematica di Tokio. Guidato da un' antecedente ricerca del Maxwell relativa alla stabilità degli anelli di Saturno, egli calcolò i periodi delle vibrazioni, che gli elettroni assumono quando vengano di poco scostati dalla posizione da essi occupata sulla loro traiettoria circolare, e trovò che tali periodi formano una serie avente lo stesso andamento generale della serie di periodi vibratori corrispondenti alle righe spettrali di alcuni elementi. Il Nagaoka supponeva gli elettroni mobili distribuiti su varî anelli, pur trascurando l' azione che sugli elettroni dell' anello,

da lui più specialmente preso in considerazione, potevano esercitare quelli degli altri anelli.

Uno studio assai simile a quello ora accennato, ma più completo, è stato poco dopo pubblicato dal Signor J. J. Thomson (197), il quale imagina pure l'atomo come costituito di due parti, una positiva ed una negativa. Ma mentre considera come parte negativa un certo numero di elettroni isolati, egli si figura la parte positiva nella stessa maniera di lord Kelvin (198), e cioè come una carica positiva ripartita uniformemente in uno spazio sferico.

Gli elettroni negativi si troverebbero nell'interno di questa sfera, per cui ciascuno di essi sarebbe esposto, oltre che alla ripulsione di ciascuno degli altri, anche ad una forza attrattiva diretta verso il centro della sfera. Facilmente si dimostra, che questa forza sarà direttamente proporzionale alla distanza dell'elettrone considerato dal centro stesso, mentre nel modello di Nagoaka la forza attrattiva è invece inversamente proporzionale al quadrato di quella distanza.

Non è possibile risolvere in tutta la sua generalità il problema delle disposizioni permanenti che possono assumere gli elettroni negli atomi ideati dal Thomson; ma fra quelle possibili egli ne trova di simili a quelle considerate dal Nagaoka. Esse consistono in elettroni distribuiti su varie circonferenze di diverso raggio, e animati da rapidi movimenti lungo le circonferenze stesse. Il numero degli elettroni presenti in ogni anello decresce passando dal più grande al più piccolo; e se essi rimangono stabilmente sulle loro traiettorie, senza speciale vincolo meccanico, come quello che esiste nel caso delle calamite galleggianti, ciò si deve alla velocità di cui sono animati. Infatti, qualora questa scenda al disotto d'un certo valore, la stabilità dell'atomo immediatamente scompare, ciò che rappresenta il caso degli atomi radioattivi.

Come aveva fatto il Nagaoka, anche il Thomson, calcola i periodi delle vibrazioni, che si compongono col moto di rivoluzione, quando gli elettroni vengono spostati di un piccolo intervallo dalla loro traiettoria, e giunge esso pure a risul-

tati che si accordano colla distribuzione delle righe nello spettro d'emissione dei gas.

Thomson cerca poi ancora di stabilire delle analogie fra gli atomi così costituiti e contenenti un numero di più in più grande di elettroni negativi in moto, e gli elementi chimici conosciuti disposti nell'ordine in cui crescono i loro pesi atomici; ma non lo seguiremo tant'oltre, anche perchè il concetto da cui egli parte contrasta con l'ipotesi fondamentale generalmente ammessa circa la costituzione della materia, secondo la quale un atòmo è considerato come un aggregato di elettroni positivi e negativi (*).

(*) Per stabilire un parallelo fra le proprietà verosimili degli atomi da lui imaginati e quelle degli atomi degli elementi conosciuti, il Thomson ammette, che la massa dell'atomo altro non sia che la somma di quelle degli elettroni negativi in esso contenuti; per cui tacitamente trascura la massa della parte positiva, con che anche più radicalmente si allontana dall'ipotesi più comunemente ammessa. Considerando poi un gruppo d'atomi di massa crescente, come per es. gli atomi contenenti 59,60, ..., 67 elettroni, che hanno di comune il carattere di avere l'anello esterno costituito da 20 elettroni, egli cerca di dimostrare, che essi devono presentare proprietà analoghe a quelle dei

Da questi accenni intorno alle idee dei fisici citati si comprenderà, come si sia ben lontani ancora dal possedere una teoria comprensiva e

corpi formanti una delle serie di Mendelejeff, per esempio la serie: Elio, Litio, Berillio, ecc. Così l'atomo con 60 elettroni, nel quale questi formano 5 successivi anelli contenenti rispettivamente 3, 8, 13, 16 e 20 elettroni, può perderne uno dal suo anello esterno di 20, senza che resti compromessa la sua stabilità, con che diverrà un ione positivo monovalente, come elettropositivo e monovalente è appunto il litio.

Similmente l'atomo di 66 elettroni può impossessarsi di un elettrone di più senza che la sua compagine resti indebolita, con che diviene elettronegativo come appunto è il fluoro. Del parí si può render conto della valenza nulla dell'elio, della bivalenza dell'ossigeno, ecc. Senonchè alle obiezioni, che già furono mosse alle considerazioni presentate dal Thomson, se ne può aggiungere una assai ovvia osservando, per esempio, che secondo il precedente ragionamento il ione positivo di litio conterebbe 59 elettroni come l'atomo di elio, e quindi dovrebbe presentare uguale peso atomico. Questa difficoltà resterebbe però eliminata qualora si prendessero in considerazione atomi costituiti alla maniera di Thomson, ma contenenti migliaia di elettroni, ed ammettendo che la differenza di numero di elettroni fra gli atomi di due elementi successivi delle serie di Mendelejeff sia non di una ma di molte unità. Senonchè non è praticamente possibile calcolare il numero di elettroni formanti ciascun anello in atomi così complessi.

soddisfacente della precisa struttura degli atomi; ciò che non toglie, che ulteriori tentativi più fortunati possano grado a grado avvicinarci allo scopo.

Ad ogni modo tutto porta verso la conclusione, che gli elettroni siano gli elementi costitutivi nell' architettura degli atomi. Quando una tale ipotesi venga adottata, resta bandito dalla scienza il dogma dell' invariabilità dell' atomo chimico, ossia della non trasformabilità delle sostanze chimiche le une nelle altre, giacchè tutte risultano allora costituite da elettroni, e già si è visto come i fenomeni della radioattività si debbano verosimilmente a trasformazioni di questo genere.

Se poi si ritiene che tutti i corpi siano almeno in minimo grado radioattivi, e quindi emettano ioni ed elettroni, queste nuove vedute intorno alla struttura della materia divengono assai simili a quelle, che più di mezzo secolo fa un fisico italiano di acuto e originale ingegno, Ambrogio Fusinieri (199), poneva a base di una spiegazione generale dei fenomeni fisici. Per quanto i con-

cetti di quel fisico lasciassero adito fin d' allora ad obbiezioni, ed oggi abbiano perduto parte del loro valore alla luce dei fatti posteriormente scoperti, si pensa subito a ciò che egli chiamava *la materia attenuata* emessa dai corpi tutti, quando si parla oggi delle emanazioni o dei raggi emessi dai corpi radioattivi, che, per una specie di lenta e invisibile evaporazione, partono probabilmente e in modo continuo da ogni sostanza materiale per diffondersi nello spazio circostante.

BIBLIOGRAFIA

(1) W. WEBER — Gesammelte Werke, t. IV, p. 279.

(2) A. RIGHI — Rend. della R. Acc. di Bologna, 18 febbraio 1894.

(3) A. RIGHI — Mem. della R. Acc. di Bologna, serie 5.ª t. VIII, p. 263 (1900).

(4) A. RIGHI — Mem. della R. Acc. di Bologna, 11 novembre 1894.

(5) J. STARK — Die Elektrizität in Gasen. — A. Barth, Leipzig, 1902.
O. LODGE — J. of the Inst. of Elec. Eng. 1903, t. 32.
J. J. THOMSON — Conduction of Electricity through Gases. — University Press. Cambridge, 1903.

(6) A. RIGHI — Mem. della R. Acc. di Bologna, 14 maggio, 1905.

(7) ERICH MARX — Phys. Zeitschr. 1905, p. 768.

(8) Da un discorso di Sir W. CROOKES al Congresso di Chimica tenuto in Berlino nel giugno 1903.

(9) J. J. THOMSON — Phil. Mag. t. 38, p. 358 (1894).

(10) Q. MAIORANA — Il N. Cimento, 4.ª serie, t. VI, p 336 (1897).

(11) J. Perrin — Comp. Rend. t. CXXI, p. 1130 (1895).

(12) P. Lenard — Wied. Ann. t. 64, p. 279 (1898).

(13) P. Lenard — Drude's Ann. t. 2, p. 359 (1900).

(14) [illegible] Trautscholdt — Zur Entdeckungs-geschichte der lichtelektrischen Erscheinungen. — Leipzig 1906.

(15) A. Righi — Mem. della Società dei XL, serie 3.ª, t. XIV (1906).

(16) J. J. Thomson and E. Rutherford — Phil. Mag. t. 42, p. 392 (1896).

(17) A. Righi — Mem. della R. Acc. di Bologna, serie 5.ª, t. VI, p. 252 (1896).

(18) A. Righi — Atti del R. Ist. Veneto, serie 6.ª, t. VII (1889).

(19) A. Righi — Rend. della R. Acc. dei Lincèi, 4 marzo 1888.

(20) P Lenard — Drude's Ann. t. I, p. 486 (1900).

(21) A. Righi — Il moto dei ioni ecc. Attualità scientifiche, I. — Zanichelli, Bologna 1903.

(22) A. Righi — Mem. della R. Acc. di Bologna, 27 aprile 1890.

(23) A. Righi — Mem. della Società dei XL, serie 3.ª, t. XIV (1906).

(24) A. Righi — Mem. della R. Acc. di Bologna, 11 novembre 1883.

(25) A. Righi — Mem. della R. Acc. dei Lincèi, 1 giugno 1884.

(26) A. Righi — Rend. della R. Acc. dei Lincèi, 3 luglio 1887 — Mem. della R. Acc. di Bologna, 9 gennaio 1888.

(27) A. Righi — Rend. della R. Acc. dei Lincèi, 12 giugno 1887 — Mem. della R. Acc. di Bologna, 9 gennaio 1888.

(28) Ch. Henry — Comp. Rend. t. CXXII. p. 312 (1896).

(29) G. H. Niewenglowski — Comp. Rend. t. CXXII, p 5 (1896).

(30) H. Becquerel — Comp. Rend. t. CXXII, p. 420 (1896).

(31) H. Becquerel — Comp. Rend. t. CXXII, p. 301 (1896).

(32) H. Becquerel — Comp. Rend. t. CXXII, p. 359 (1896).

(33) A. Righi — Rend. della R. Acc. di Bologna, 9 febbraio 1896. Il fenomeno stesso fu osservato simultaneamente da varii fisici.

(34) A. Righi — Rend. della R. Acc. di Bologna, 29 maggio 1904.

(35) A. Righi — Rend. della R. Acc. dei Lincèi, 5.ª serie, t. XIII p. 235 (1904).

(36) G. C. Schmidt — Wied. Ann. t. 65, p. 141 (1898).

(37) S. Curie — Com. Rend. t. CXXVI, p. 1101 (1897).

(38) P. et S. Curie — Comp. Rend. t. CXXVII, p. 175 (1898).

(39) P. et S. Curie et G. Bémont — Comp. Rend. t. CXXVII, p. 1215 (1898).

(40) A. Debierne — Comp. Rend. t. CXXIX, p. 593 (1899).

(41) J. Elster und H. Geitel — Wied. Ann. t. 69 (1899).

(42) F. Giesel — Ber. deutsch. chem. Ges. t. 33, p. 3569 (1901).

(43) K. Hofmann und E. Strauss — Ber. deutsch. chem. Ges. t. 33, p. 3126 (1900); t. 34, p. 3035 (1901): t. 35, p. 1453 (1902).

(44) K. Hofmann und V. Wölf — Chem. Ber. t. 36, p. 1040 (1903).

(45) W. Marckwald — Phys. Zeitschr. t. IV, p. 51 (1902).

(46) F. Giesel — Chem. Ber. t. 36, p. 728 (1903).

(47) C. Baskerville — J. amer. chem. soc. t. 23, p. 761.

(48) F. Giesel — Ber. d. deutsch. Chem. Ges. p. 3608 (1902); p. 342 (1903).

(49) E, Rutherford — Radioactivity, 2.ª Edition, p. 21.

(50) Hahn und Sackur — Ber. d. deutsch. chem. Ges. p. 1943 (1905).

(51) W. Marckwald — Ber. d. deutsch. chem. Ges. p. 2264 (1905).

(52) R. Blondlot — Comp. Rend. t. CXXXVI, p. 735 (1903) e fascicoli successivi.

(53) Strutt — Phil. Trans. t. 196, p. 525 (1901).

(54) H. Becquerel — Comp. Rend. t. CXXXVI, p. 181 (1903).

(55) J. J. Thomson — Proc. Camb. Phil. Soc. Pt. 1, p. 39, (1905); Nature, March 9 (1905).

(56) E. Rutherford — Bakerian Lecture, Phil. Trans, p. 169 (1904); Nature, March 2, (1905).

(57) Soddy — Nture, August 2, (1906).

(58) H. Becquerel — Comp. Rend. t. CXXIX, p. 912 (1899).

(59) F. Giesel — Wied. Ann. t. 69, p. 834 (1899).

(60) S. Meyer und E. von Schweidler — Physik. Zeitschr. t. 1, p. 90, 113 (1899).

(61) E. Dorn — Comp. Rend. t. CXXX, p. 1126 (1900).

(62) P. et S. Curie — Comp. Rend. t. CXXX, p. 647 (1900).

(63) W. Crookes — Proc. Roy. Soc. t. LXXI, p. 405 (1904).

(64) H. Becquerel — Comp. Rend. 27 ottobre 1903, p. 629.

(65) W. Huggins and Lady Huggins — Proc. Roy. Soc. p. 196 (1903).

(66) W. Huggins and Lady Huggins — Proc. Roy. Soc. London, 1905.

(67) H. Becquerel — Comp. Rend. 25 janvier 1904.

(68) W. Wien — Phyis. Zeitschr. t. IV, p. 624 (1903).

(69) E. Dorn — Phys. Zeitschr. t. IV, p. 507 (1903).

(70) R. J. Strutt — Phil. Mag. Nov. 1903, p. 588.

(71) A. Righi — Rend. della R. Acc. di Bologna, 29 maggio 1904.

(72) P. Curie — L'Electricien, 23 janvier 1904.

(73) A Stefanini e L. Magri — Il N. Cimento, marzo 1904, p. 170.

(74) P. Curie — Comp. Rend. t. CXXXIV, p. 420 (1902).
H. Becquerel — Comp. Rend. t. CXXXVI, p. 1173 (1903).

(75) A. Righi — Rend. della R. Acc. dei Lincei, 5.ª serie, t. XIV, p. 207.

(76) A. Becker — Phys. Zeitschr. t. 6, p. 877.

(77) A. Heydweiller — Phys. Zeitshr. t. IV, p. 81 (1902).

(78) E. Dorn — Phys. Zeitschr. t. IV, p. 530 (1902).

(79) P. Curie et A. Laborde — Comp. Rend. t. CXXXVI, p. 673 (1903).

(80) PEGRAM — Science, 27 mai 1904,

(81) N. GEORGIEWSKI — Jour. de la Soc. Phys. Chim. russe t. 35, p. 353 (1903).

(82) A. RIGHI — Mem. della R. Acc. di Bologna, serie 5.ª, t. X, p. 595 (1903).

3) A. RIGHI — Mem. della R. Acc. di Bologna, 14 maggio 1905.

(84) H. BECQUEREL et P. CURIE — Comp. Rend. t. CXXVII, p. 1289 (1901).

(85) J. DANYSZ — Comp. Rend. t. CXXXVI, p. 461 (1903).

(86) ASCHKINASS und CASPARI — Arch. für die Ges. Physiol. t. 86 (1901).

(87) DANLOS — Soc. de derm., 7 nov. 1901.
HALLOPAU et GADAUD — Soc. de derm., 3 juillet 1902.

(88) G. TIZZONI e BONGIOVANNI — Mem. della R. Acc. di Bologna, 9 aprile, 28 maggio 1905. — Le Radium, 15 oct. 1905, p. 339.

(89) J. B. BURKE — Fortnightly Review, Sept. 1905, p. 389; Journal of the Röntgen Society, december 1905.

(90) W. RAMSAY — Revue générale des Sciences, 30 septembre 1905.

(91) W. A. D. RUDGE — Nature, octobre 26, p. 631; november 23, p. 78; november 30, p. 119 (1905); march. 8, p. 455 (1906).

(92) A. RIGHI — Mem. della R. Acc. di Bologna, 11 dicembre 1879.

(93) E. BLOCH — Comp. Rend. t. 132, p. 914 1901).

(94) R. B. OWENS — Phyl. mag., t. 48, p. 1, 161 (1900),

(95) E. RUTHERFORD — Phil., mag, t. 49, p. 1, 161 (1900).

(96) E. DORN — Abh. d. Naturforsch. Ges. fur Halle (1900).

(97) A. DEBIERNE — Comp. Rend. t. CXXXVI, p. 146 (1903).

(98) H. R v. TRAUBENBERG — Phys. Zeitschr. 1 märz 1904, p. 130.

(99) E. RUTHERFORD and F. SODDY — Phil. Mag. May 1903, p. 561.

(100) E. RUTHERFORD — Nature, october 25, 1906.

(101) P. et S. CURIE — Comp. Rend. t. CXXIX (1899).

(102) E. RUTHERFORD — Radioactivity, p. 430.

(103) ELSTER und GEITEL — Phys. Zeitschr. III, p. 76 (1901).

(104) A. SELLA — Il Nuovo Cimento, t. 3, p. 138; t. 4, p. 131 (1902).

(105) E. RUTHERFORD and H. T. BARNES — Phil. Mag.-Febr. 1904, p. 202.

(106) O. LODGE — Nature, Avril 2 (1903).

(107) J. J. THOMSON — Nature, febr. 26 (1903).
R. J. STRUTT — Phil. Mag. June 1903, p. 680.
I. C. MAC LENNAN and E. E. BURTON — Phil. Mag.-june 1903, p. 691.

(108) E. RUTHERFORD — Nature, 1903, p. 511.
H. LESTER COOKE — Phil. Mag. October 1903, p. 403.

(109) A. S. EVE — Phil. Mag. Sept. 1906, p. 189.

(110) J. J. THOMSON — Nature, 1903, p. 90.

(111) I. ELSTER und H. GEITEL — Physik. Zeitschr. 1904, p. 11.

(112) H. S. ALLEN — Nature, August 13, 1903.

(113) S. LOEWENTHAL — Phys. Zeitschr. 15 august 1906.

(114) R. NASINI, F. ANDERLINI e M. Levi — Rend. della R. Accademia dei Lincei, t. XIV, p. 70 (1905).

G. VICENTINI e R. ALPAGO — Atti del R. Ist. Ven, t. LX part. 2, p. 1187.

(115) A. BATTELLI, A. OCCHIALINI e S. CHELLA — Rend. della R. Academia dei Lincei, t. XV, p. 262, 1906.

(116) Vedi al n. 108.

(117) COHEN — Zeitschr. f. Elektrochemie, t. XII, p. 609.

(118) G. BABOROVSKY und V. VOJTÊCH — Physik. Zeitschr. 15 november 1906, p. 846.

(119) P. et CURIE — Comp. Rend. t. CXXXIV, p. 85 (1902).

(120) SAGNAC — Journal de Physique, juillet 1906.

(121) J. J. THOMSON — Nature, p. 601 (1903).

(122) J. ELSTER und H. GEITEL — Beiblätter 1899, p. 433.

(123) E RUTHERFORD and F. SODDY — Phil. Mag. May 1903, p. 576.

(124) W. CROOKES — Proc. Roy. Soc. t 66, p. 409 (1900).

(125) H. BECQUEREL — Comp. Rend. t. CXXXI, p. 173 (1900); t. CXXXIII, p. 977 (1901).

(126) H. BECQUEREL — Comp. Rend. 10 juillet 1905.

(127) R. B. MOORE and H. SCHMIDT — Phil. Mag. October 1906, p. 393.

(128) E. RUTHERFORD — Radioactivity, 2.e edition, p. 458.

(129) E. RUTHERFORD — Radioactivity, 2.e edition, p. 224.

(130) E. RUTHERFORD and F. SODDY — Phil. Mag. Sept. 1902.

(131) W. RAMSAY — Journal de Chim. Phys. t. 3, p. 617 (1905).

(132) O. HAHN — Proc. Roy. Soc. London, LXXVI p. 105 (1905).

(133) G. A. BLANC — Comp. Rend. du Congrès de Liège 1905; Rend. della R. Acc. dei Lincei, t. XV, n. 6-7 (1905). — BLANC e ANGELUCCI — Rend. della R. Acc. dei Lincei, 24 aprile 1906.

(134) J. ELSTER und H. GEITEL — Phys. Zeitschr. n. 12, 1906.

(135) B. BOLTWOOD — Am. Journ. of Sc. t. XXI, n. 126 (1906)

(136) H. M. DADOURIAN — Am. Journ. of Sc. t. XXI, n. 126 (1906).

(137) O. HAHN — Nature, April 1906; Phil. Mag. Sept. 1906, p. 244.

(138) E. RUTHERFORD — Radioactivity, 2.e edition, cap. XI.

(139) MISS J. M. W. SLATER — Phil. Mag. October 1905, p. 460.

(140) W. MAKOWER — Phil. Mag. October 1905, p. 526.

(141) A. DEBIERNE — Comp. Rend. t. CXXXVI, p. 446, 671; t. CXXXVIII, p. 411 (1904).

(142) F. GIESEL — Ber. d. deutsche chem. Ges. t. 36, p. 342 (1903).

(143) H. L. BRONSON — Phil. Mag. July 1906, p. 73.

(144) E. RUTHERFORD — Radioactivity, 2.e edit. cap. IX.

(145) H. L. BRONSON — Phil. Mag. July 1906, p. 73.

(146) S. CURIE — Thèse de Doctorat, Paris 1903, p. 116.

(147) H. BECQUEREL — Comp. Rend., 12 février 1906.

(148) J. J. THOMSON — Phil. Mag. t. 10, p. 163 (1905).

(149) BRAGG and KLEEMAN — Phil. Mag., December 1904.

(150) J. J. E. DURACK — Phil. Mag. July 1902, p. 29; May 1903, p. 550.

(151) O. HAHN — Phil. Mag. July 1906, p. 82; September 1906, p. 244.

(152) Vedi n. 149.

(153) M. LEVIN — Am. Journ. of Science, July 1906.

(154) S. MEYER und E. von SCHWEIDLER — Wien. Ber., mai 25, 1906.

(155) PICKERING — Astrophys. Journ. t. 14, p. 368, (1901).

(156) Mc COY — Ber. d. chem Ges., p. 2641 (1904).
R. J. STRUTT — Nature, March 17 and July 7, 1904.
B. BOLTWOOD — Phil. Mag. April 1905.
E. RUTHERFORD and B. B. BOLTWOOD — Le Radium, juillet 1906.

(157) WHETHAN — Nature, may 5, 1904; Jan. 26, 1905.
F. SODDY — Nature, may 12, 1904; Jan. 19, 1905.

(158) B. B. BOLTWOOD — Nature, November 15, 1906.

(159) R. J. STRUTT — Proc. Roy. Soc. London, Mars 2 Juin 8, 1905.

(160) F. SODDY — Nature, Aug. 30, 1906, p. 453.

(161) E. RUTHERFORD and F. SODDY — Phil. Mag. p. 582, 1902; p. 453 and 579, 1903.

(162) W. RAMSAY and F. SODDY — Nature, July 16, p. 246, 1903.

(163) DEWAR et CURIE — Comp. Rend. 25 janvier 1904, p. 190.

(164) HIMSTEDT und Meyer — Ann. d. Phys., t. 15, p. 184 (1904); t. 17, p. 1005 (1905).

(165) MACKENZIE — Phil. Mag., t. 10, p. 538 (1905).

(166) E. Rutherford — Phil. Mag., July 1905.

(167) E. Rutherford — Phil. Mag. October 1906, p. 348.

(168) E. Rutherford and O. Hahn — Phil. Mag., October 1906, p. 371.

(169) A. Debierne — Comp. Rend., 14 août 1906.

(170) O. Lodge — Nature, June 11, 1903, p. 129.

(171) W. Kaufmann — Wied. Ann. t. 61, p. 544; t. 62, p. 596; t. 65, p. 431 (1898).

(172) S. Simon — Wied Ann. t. 69, p. 589 (1899).

(173) J. J. Thomson — Phil. Mag. t. 44, p. 293 (1897).

(174) J. J. Thomson — Phil. Mag. t. 44, p. 293 (1897).

(175) H. A. Wilson — Proc. Camb. Phil. Soc. 1901, p. 179.

(176) P. Lenard — Wied. Ann. t. 64, p. 279 (1898).

(177) P. Lenard — Wied. Ann. t. 65, p. 504 (1898).

(178) E. Wiechert — Wied. Ann. t. 69, p. 739 (1899).

(179) J. J. Thomson — Phil. Mag. t. 48, p. 547 (1899).

(180) A. Righi — Mem. della R. Acc. di Bologna, serie 4.ª t. X, p. 110 (1890).

(181) J. J. Thomson — Phil. Mag. t. 48, p. 547 (1899).

(182) P. Lenard — Drude's Ann. t. 2, p. 359 (1900).

(183) H. Becquerel — Rapports du Congrès de Physique de Paris, t. III, p. 47.

(184) W. Kaufmann — Gött. Nach. november 8, 1901; juli 26, 1902; marz 7, 1903.

(185) W. Wien — Wied. Ann. t. 65, p. 440 (1898).

(186) J. J. Thomson — Vedi al n. 5.

(187) J. S. Twonsnde — Phil. Trans. 1900, p. 259.

(188) J. J. Thomson — Phil. Mag. December 1898, p. 528.

(189) C. T. R. Wilson — Phil. Trans. 1897, p. 265.

(190) J. J. Thomson — Phil. Mag. March 1903, p. 346.

(191) H. A. Wilson — Phil. Mag. April 1903, p. 429.

(192) O. Lodge — Vedi al n. 5.

(193) Erich Marx — Vedi al n 7.

(194) A. M. Mayer — Phil. Mag. February 1879, p. 98.

(195) A. W. Porter — Nature, October 4, 1906.

(196) H. Nagaoka — Nature, February 25, June 9, 1904.

(197) J. J. Thomson — Phil. Mag. March 1904, p. 237.

(198) Lord Kelvin — Phil. Mag. March 1902, p. 257.

(199) A. Fusinieri -- Memorie, Padova 1844, 1846, 1847.

ATTUALITÀ SCIENTIFICHE

1. **Righi Augusto** — Il moto dei ioni nelle scariche elettriche. Seconda edizione con aggiunte — un vol. con 3 tavole e 11 figure interc. nel testo L. 3 —
2. **Giacomo Ciamician** — I problemi chimici del nuovo secolo. Seconda edizione — un vol. . . . . » 2 —
4. **Virgilio Ducceschi** — Evoluzione morfologica ed evoluzione chimica — un volume . . . . » 2 —
5. **Carlo Emery** — La determinazione del sesso dal punto di vista biologico — un vol. con una tavola e figure . . . . » 2 —
6. **Augusto Righi** — Il Radio — un vol. con 13 incisioni e 3 tavole fotozincografiche . . . . » 3 —
7. **Lavoro Amaduzzi** — Il Selenio — un vol. con figure . . . » 3 —
8. **Ing. Giovanni Giorgi** — Le ferrovie a trazione elettrica — un vol. con 13 figure nel testo . . . . » 3 —
9. **Lavoro Amaduzzi** — La convezione elettrica nei gas. — L'atomo elettrico — La ionizzazione — un vol. con numerose figure . . . » 5 —

BIBLIOTECA DI OPERE SCIENTIFICHE

Bonola Roberto — La geometria non-euclidea — Esposizione storico critica del suo sviluppo — un volume con 69 figure. . . . . . . L. 5 —

Donati Luigi — Introduzione elementare all' elettrotecnica — un volume con 115 figure intercalate nel testo. . . . . » 10 —

Enriques Federigo — Lezioni di geometria proiettiva — Seconda edizione — un volume con figure intercalate . . . . » 10 —

Detto — Lezioni di geometria descrittiva — un volume con 24 tavole fuori testo. . . . . » 12 —

Detto — Problemi della scienza — un volume . . . . » 10 —

Pincherle Salvatore — Lezioni di algebra complementare dettate nella R. Università di Bologna e redatte per uso degli studenti — Analisi Algebrica — un volume in-8 . . . . » 10 —

Detto e U. Amaldi — Le operazioni distributive e le loro applicazioni all' analisi — un volume . . . . » 15 —

Pizzetti Paolo — Trattato di geodesia teoretica — un volume con 71 figure intercalate nel testo . . . . » 12 —

Questioni riguardanti la geometria elementare trattate da U. Amaldi, E. Baroni, R. Bonola, B. Calò, G. Castelnuovo, A. Conti, E. Daniele, F. Enriques, A. Giacomini, A. Guarducci, G. Vitali — Raccolte e coordinate da Federigo Enriques — un volume con 10 tavole e 40 figure . . . » 12 —

Righi Augusto — L'ottica delle oscillazioni elettriche — Studio sperimentale sulle produzioni di fenomeni analoghi ai principali fenomeni ottici per mezzo delle onde elettromagnetiche — un vol. con 38 fig. . . . » 5 —

Righi Augusto e Bernardo Dessau — La telegrafia senza filo — Seconda edizione largamente aumentata — un volume di 640 pagine con 293 figure . . . . » 12 —

Rignano Eugenio — Sulla trasmissibilità dei caratteri acquisiti — Ipotesi di una centro-epigenesi — un volume . . . . » 5 —

Rouse Ball W. W. — Breve compendio di storia delle matematiche. Versione dall' inglese con note aggiunte e modificazioni dei dottori Dionisio Gambioli e Giulio Puliti, riveduta e corretta dal prof. Gino Loria.

Volume primo — Le Matematiche dall' antichità al rinascimento — un volume . . . . » 8 —

Volume secondo — Le Matematiche Moderne sino ad oggi. Con un' appendice « su alcuni matematici italiani dei tempi recenti » di Dionisio Gambioli — un volume . . . . » 12 —

Severi Francesco — Complementi di geometria proiettiva. Raccolta di oltre 300 problemi colle relative soluzioni — un vol. con fig. . » 10 —